Dott. Ing. RICCARDO BARONI

SEMICONDUTTORI TRANSISTORI DIODI AL GERMANIO

TEORIA - TECNOLOGIA - APPLICAZIONI

69 figure, 58 circuiti applicativi, 7 tabelle, 8 tavole fuori testo

EDITORE ULRICO HOEPLI MILANO

Dott. Ing. RICCARDO BARONI

SEMICONDUTTORI TRANSISTORI DIODI AL GERMANIO

TEORIA - TECNOLOGIA - APPLICAZIONI

69 figure, 58 circuiti applicativi
7 tabelle, 8 tavole fuori testo

EDITORE ULRICO HOEPLI MILANO
1957

AI MIEI GENITORI

PREFAZIONE

Il presente volume si prefigge lo scopo di fornire una trattazione sui semiconduttori e sui vari complessi che da questi derivano, in modo che il lettore abbia alla fine un'idea generale, ma il più completa possibile, su questo nuovo campo dell'elettronica.

Nell'intento di raggiungere tale scopo, il volume tratta la materia nei suoi tre aspetti fondamentali, e cioè teoria, tecnologia ed applicazioni, ed in tale senso è stato suddiviso.

Nella prima parte sono esposte, nel modo più semplice possibile, tutte le nozioni indispensabili per una buona comprensione del funzionamento dei dispositivi a semiconduttori. Partendo dalla costituzione della materia, e proseguendo man mano ad esporre le nozioni indispensabili della fisica dello stato solido, si giunge alla spiegazione del funzionamento dell'effetto raddrizzante di un contatto puntiforme e di una giunzione, ed infine dell'effetto transistore. Salvo alcuni punti, che richiedono una certa conoscenza dell'elettronica e della fisica, tutta questa prima parte dovrebbe essere accessibile anche ad un profano.

La seconda parte espone i procedimenti attualmente usati dalla tecnologia moderna, dall'estrazione del germanio dai suoi minerali, alla formazione del monocristallo ed al montaggio dei vari complessi.

Una breve trattazione del transistore, considerato come un quadripolo attivo, dei vari circuiti equivalenti e dei parametri che servono per la progettazione di un qualunque circuito, apre la terza parte, che riporta un buon numero di circuiti applicativi dei transistori. Questa raccolta di schemi potrà forse apparire un po' arida, ma va tenuto presente il fatto che non è stato assolutamente possibile corredare ogni circuito con un'ade-

guata spiegazione di tutti i dettagli, senza esulare dai limiti prefissati, per cui si è preferito riportare nell'edizione originale i singoli circuiti, citandone la fonte, e rimandandovi così il lettore cui non fosse sufficiente il solo schema.

I vari argomenti non sono stati svolti molto a fondo, ma neppure troppo superficialmente; necessariamente non molto a fondo, perchè in tal caso le dimensioni del volume sarebbero risultate eccessive, e di proposito non troppo superficialmente, perchè ciò avrebbe nociuto alla serietà del lavoro.

In ogni caso, tutta la trattazione non è frutto solo di arida consultazione bibliografica, ma è prevalentemente tratta da una lunga esperienza personale nel campo, cosa questa che può aggiungere vivezza all'attualità dell'argomento trattato e giustificare la speranza nel raggiungimento dello scopo del non indifferente lavoro.

INDICE DELLA MATERIA

PARTE PRIMA

TEORIA

PARTE SECONDA

TECNOLOGIA

PARTE TERZA

APPLICAZIONI

PARTE PRIMA

TEORIA

CAPITOLO I

COSTITUZIONE DELLA MATERIA

1-1. Configurazioni atomiche.

La materia, cioè tutto ciò che occupa lo spazio, è formata da un numero immenso di particelle elementari, chiamate molecole. Una molecola è la più piccola porzione di una sostanza che non può venire ulteriormente divisa, senza alterare le proprietà fisiche e chimiche della sostanza stessa.

La distinzione in sostanze solide, liquide e gassose si riferisce allo stato di aggregazione molecolare — alle condizioni di temperatura e di pressione normali — ma una stessa sostanza si può presentare in più stati, variando la temperatura o la pressione, o entrambe.

Le molecole sono formate da due o più atomi, legati fra loro mediante forze di attrazione dovute ai legami di valenza.

Un atomo è la più piccola parte in cui la materia può essere divisa. In natura esistono 92 specie di atomi diversi, detti elementi. L'atomo è composto a sua volta da particelle più piccole, il cui numero, disposizione e movimenti differiscono nei singoli elementi e determinano le diverse proprietà chimiche e fisiche di questi ultimi.

Le particelle che formano l'atomo sono molto distanziate le une dalle altre, in relazione alle loro dimensioni, e formano un sistema analogo a quello solare.

La funzione del sole è svolta da una o più particelle con carica elettrica positiva, che costituiscono il nucleo dell'atomo, intorno al quale ruotano come pianeti alcune particelle uguali, e con carica negativa, chiamate elettroni, in numero variabile a seconda dell'elemento (da 1 elettrone per l'idrogeno fino a 92 per l'uranio).

La somma delle cariche negative è numericamente uguale alla carica positiva nel nucleo, cioè il numero degli elettroni periferici, che

ruotano attorno al nucleo, è esattamente uguale al numero di cariche positive presenti nel nucleo.

Il numero atomico indica il numero di cariche positive presenti nel nucleo. Il riferimento è fatto rispetto alle cariche positive del nucleo, anzichè alle cariche negative (elettroni) ruotanti attorno ad esso, perchè, come si vedrà, il numero degli elettroni periferici di un atomo può, in determinate circostanze, variare, mentre la carica positiva del nucleo costituisce un numero fisso ed inalterabile per ogni elemento.

Gli elettroni percorrono lo spazio intorno al nucleo, seguendo orbite ben determinate, di forma ellittica, di cui il nucleo costituisce uno dei fuochi.

I luoghi delle orbite normali dei vari elettroni, quando l'atomo non è eccitato, costituiscono degli strati o livelli, che possono essere in numero di 7 e vengono caratterizzati dalle lettere *K L M N O P Q*, procedendo dallo strato più vicino al nucleo verso quello più esterno. Ogni strato è « saturo » per un dato numero di elettroni, numero che varia da 2 a 32, a seconda dello strato e dell'elemento.

Gli elettroni, nel loro moto di rivoluzione attorno al nucleo, non sono liberi di seguire un percorso qualsiasi, ma sono obbligati a muoversi solamente lungo uno dei 7 strati citati. In altre parole, per un elettrone non è « possibile » un percorso qualsiasi, ma solo uno degli strati.

In condizioni di riposo, ogni elettrone gira sulla sua orbita, ma se l'atomo viene in qualche modo eccitato, uno o più elettroni possono cambiare strato, saltando verso strati più esterni, reali o possibili. Questi salti corrispondono all'assorbimento di una determinata radiazione, la cui energia sia in grado di far compiere all'elettrone questo lavoro.

Al ritorno dell'atomo dallo stato eccitato allo stato normale, corrisponde un salto dell'elettrone da una determinata orbita esterna su di un'orbita più interna in cui vi è un posto vuoto; a questo salto corrisponde l'emissione, da parte dell'atomo, di una radiazione, la cui frequenza è tanto più alta (e quindi l'energia tanto maggiore) quanto più vicino al nucleo è lo strato su cui l'elettrone va a finire.

Naturalmente questi strati distinti delle orbite degli elettroni, non vanno intesi in senso materiale, ma bensì come livelli di energia discreti e ben determinati.

Su questo argomento torneremo più avanti (cap. III).

I legami che tengono uniti fra loro i vari atomi per costituire una molecola, sono originati dagli elettroni dell'orbita più esterna dell'atomo. Per chiarire le idee, facciamo alcuni esempi, partendo dall'elemento di costituzione atomica più semplice e di numero atomico più basso, l'idro-

geno, e proseguendo nell'analisi dei vari elementi per numero atomico crescente, nello stesso ordine col quale sono disposti nella classica tavola periodica degli elementi. In figura 1-1 sono schematizzati i modelli atomici, secondo Bohr, di alcuni elementi.

L'elemento di numero atomico *1*, l'idrogeno, ha l'atomo costituito dal nucleo con una sola carica positiva e da un unico elettrone, che occupa lo strato K; l'elemento di numero atomico *2*, l'elio, è un gas nobile, ed ha una carica nucleare positiva 2, e quindi 2 elettroni perife-

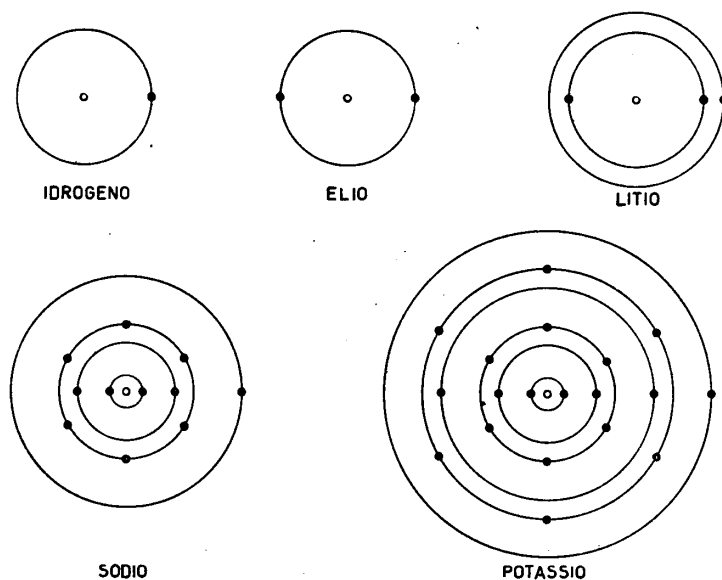



Fig. 1-1 – Modelli atomici secondo Bohr.

rici, entrambi sullo strato K. Questo strato è saturo con 2 elettroni, per tutti gli elementi.

Bisogna rilevare una cosa essenziale, a questo punto.

Quando un elemento si trova ad avere lo strato più esterno saturo, esso è assolutamente stabile, inerte, non reagisce cioè con nessun altro elemento. È per questo motivo che tali elementi prendono il nome di gas nobili, di cui l'elio è il primo esempio. L'elemento successivo è il litio, con numero atomico *3*, e quindi carica nucleare 3, ha lo strato K con 2 elettroni, e lo strato L con un solo elettrone. Questo elettrone però è legato al nucleo meno fortemente di quelli dello strato K, e può quindi venire asportato con relativa facilità. Esso prende il nome di « elettrone di valenza ».

Il concetto di « valenza » di un elemento può venire espresso in diversi modi. La definizione più semplice, ma anche la più impropria e la meno completa, è la seguente:

« La valenza è la capacità che ha l'atomo di un elemento di combinarsi con uno o più atomi di idrogeno ».

In altre parole, si può dire che la valenza di un elemento è rappresentata dal numero di atomi di idrogeno che si combinano con un atomo dell'elemento stesso, per dare un composto stabile.

Come abbiamo detto, questo è il concetto chimico generale, che dà soltanto un'idea superficiale del complesso meccanismo che regola le forze di coesione e di legame fra gli atomi di uno stesso elemento, o fra gli atomi di elementi diversi.

Più avanti vengono però spiegati questi fenomeni secondo la teoria elettronica della valenza.

Possiamo però fin d'ora dare un'altra definizione della valenza, che può spiegarne meglio il concetto. « La valenza di un elemento è data dal numero di unità di cui il suo numero atomico si differenzia dal numero atomico del gas nobile del suo periodo ».

Ciò risulta chiaro, pensando alla struttura di un atomo, secondo il modello di Bohr ora esposto. Abbiamo detto che un gas nobile è un elemento che ha lo strato più esterno saturo, cioè gli elettroni strettissimamente vincolati al loro nucleo. È evidente che gli atomi di un gas nobile non possiedono elettroni di valenza, e non possono pertanto reagire o combinarsi, nè fra loro, nè con altri atomi, perchè non hanno la possibilità nè di cedere nè di procurarsi elettroni. Un gas nobile ha perciò valenza zero, o, come si usa dire, è « avalente ».

Invece l'atomo di un elemento, che, come il litio, ha lo strato più esterno (nel caso specifico lo strato L) occupato da un solo elettrone, mentre sarebbe stabile con 8, può perdere questo elettrone, cedendolo ad un atomo di un altro elemento, e può trasformarsi in ione positivo monovalente.

Il berillio ha numero atomico *4*, quindi carica nucleare positiva 4 e possiede, oltre i 2 elettroni nello strato K, due elettroni di valenza nello strato L. Esso è perciò sempre bivalente.

Il boro, con carica nucleare positiva 5, ha 3 elettroni nello strato L ed è trivalente.

Il carbonio presenta 4 elettroni di valenza nello strato L. Se li perde tutti e quattro, si trasforma in ione positivo tetravalente, però può verificarsi anche un altro caso: lo strato L è completamente saturato quando contiene 8 elettroni; acquistando altri 4 elettroni e trasformandosi quindi in ione negativo tetravalente, il carbonio com-

pleta il suo strato L, e con un totale di 10 elettroni (2 nello strato K, 8 nello strato L) viene ad assumere la configurazione elettronica, particolarmente stabile, del gas nobile che lo segue nel sistema periodico, il neo.

Analogamente l'azoto, con 5 elettroni nello strato L, può o perderli tutti, trasformandosi in ione pentavalente positivo, oppure può acquistarne altri 3, diventando un ione trivalente negativo.

Proseguendo di questo passo, troviamo l'ossigeno, con 6 elettroni nello strato L e tendenza ad acquistarne altri 2, trasformandosi in ione bivalente negativo, di configurazione elettronica $K2L8$, il fluoro, con 7 elettroni nello strato L, il neo, con 8 elettroni nello strato L, e quindi stabile, inerte, gas nobile.

L'elemento successivo è il sodio, con undici elettroni, di cui 2 nello strato K, 8 nello strato L, ed uno nello strato M.

Anche qui, come si è già visto per il litio, questo nuovo elettrone più lontano dal nucleo, e legato meno fortemente degli altri, si può allontanare con facilità, dando luogo alla formazione dello ione sodio monovalente positivo.

Procedendo nell'elenco, man mano lo strato M si completa e dopo il cloro, con 2 elettroni nello strato K, 8 nello strato L e 7 nello strato M, si arriva all'argo, gas nobile, con configurazione elettronica stabile $K2$ $L8$ $M8$.

Segue il potassio, che presenta la configurazione elettronica $K2$ $L8$ $M8$ $N1$, e così via, fino all'ultimo elemento, il più complesso, l'uranio, che ha un solo elettrone nell'orbita Q, e presenta la configurazione elettronica $K2$ $L8$ $M18$, $N32$, $O18$, $P13$, $Q1$.

Si vede pertanto che la valenza di un elemento dipende esclusivamente dal numero di elettroni presenti sullo strato più esterno dell'atomo. La perdita di uno o più elettroni determina le valenze positive, e l'acquisto di altrettanti elettroni, le valenze negative.

1-2. Legami eteropolari ed omopolari.

La forza che tiene uniti gli atomi nei cristalli solidi composti è l'attrazione elettrostatica fra gli ioni, portanti cariche di segno opposto; naturalmente, perchè il composto sia elettricamente neutro, i numeri delle cariche dell'anione (elettroni acquistati dall'atomo per trasformarsi in ione negativo) deve uguagliare il numero delle cariche del catione (elettroni perduti dall'atomo per trasformarsi in ione positivo). Questa teoria della valenza per legame eteropolare è dovuta a Kossel. Presupposto essenziale è che i 2 atomi che si combinano fra loro

debbano essere di carattere « opposto », cioè devano ionizzarsi uno per perdita e l'altro per acquisto di elettroni.

Vi sono però moltissimi composti nei quali non si trova questa opposizione, ed in cui non si può dire quale atomo sia positivo e quale negativo, primi fra tutti i composti degli elementi con se stessi, cosa che si verifica per esempio nelle molecole poliatomiche degli elementi allo stato libero, come H_2, N_2, O_2, Cl_2, S_8, ecc.

In questi composti ci si trova di fronte ad un nuovo tipo di legame chimico, diverso dal precedente nel meccanismo fisico che gli corrisponde, ma non meno stabile di quello; basta pensare alla rilevante quantità di energia necessaria per dissociare una molecola poliatomica negli atomi elementari che la compongono, ed alla facilità con la quale detti atomi si ricompongono per formare nuovamente le molecole poliatomiche.

Questo tipo di legame, chiamato « legame omopolare », fu studiato dal Lewis, il quale formulò l'ipotesi che certi elettroni possano essere tenuti in comune, condivisi, da due atomi, e che in conseguenza a ciò, si raggiunga, per il complesso, quella configurazione elettronica stabile di otto elettroni nell'involucro esterno, che si trova nei gas nobili e di cui è caratteristica la stabilità.

La dinamica dell'elettrone condiviso non è ancora perfettamente nota; per i nostri scopi basta ammettere che, come nell'atomo isolato l'elettrone ruota attorno al nucleo, così un elettrone condiviso fra due atomi ruoti attorno ad entrambi i nuclei.

Gli elettroni sono comunque uno dei costituenti essenziali in tutti gli atomi, nei quali sono sempre presenti. Di conseguenza si trovano in qualsiasi sostanza e contribuiscono a determinarne le proprietà fisiche.

1-3. Conduttori, semiconduttori ed isolanti.

Le due grandi categorie in cui si possono distinguere le sostanze, dal punto di vista della conducibilità elettrica, sono gli isolanti (o coibenti) ed i conduttori, il cui diverso comportamento deriva da una diversa configurazione dell'aggregato atomico e molecolare costituente il corpo.

Negli isolanti, la struttura atomica è tale, per cui ogni atomo trattiene stabilmente i propri elettroni satelliti, senza consentire alcuna possibilità di scambi di elettroni fra edifici contigui: in queste condizioni non può prodursi evidentemente alcun movimento di elettroni in seno al corpo da un atomo all'altro, e perciò appunto nei corpi isolanti

non può prodursi alcuna corrente elettrica permanente in una direzione determinata.

Nei conduttori invece, e particolarmente nei metalli, gli elettroni periferici di ciascun atomo non sono stabilmente vincolati ai rispettivi nuclei, ma hanno la possibilità di spostarsi da un atomo all'altro, per cui si ha un certo numero di elettroni « liberi ». Questo numero, nei metalli, è dell'ordine di un elettrone per atomo.

Se intervengono delle forze esterne, come per esempio un campo elettrico, questi elettroni liberi possono spostarsi lungo il corpo in una direzione determinata, sostituendosi a vicenda. Per questa ragione gli elettroni liberi, che partecipano a questo movimento d'assieme, sono

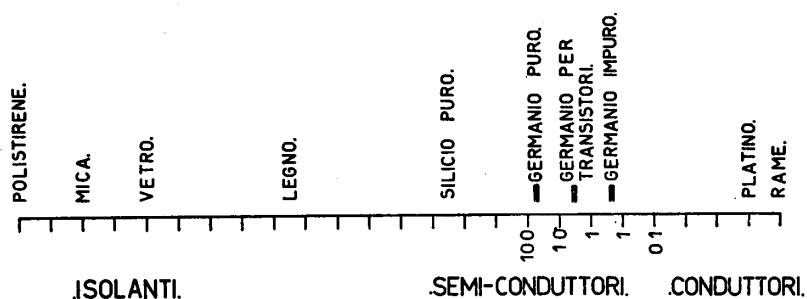



Fig. 1-2 - Resistività in Ω cm per le varie categorie di materiali.

stati indicati anche, nel loro complesso, col nome di « gas elettronico » dei metalli. La libertà di movimento di questo gas elettronico interpreta il fenomeno della conduzione elettrica dei metalli, e la corrente elettrica nei metalli stessi è rappresentata precisamente da un moto di scorrimento di questi elettroni in una direzione determinata. Così la corrente elettrica in un filo metallico deve essere concepita come un moto di scorrimento lungo il filo stesso, degli elettroni liberi che vi sono contenuti.

Fra coibenti e conduttori si trovano degli elementi che presentano caratteristiche intermedie. Questi elementi sono i semiconduttori, che formano l'oggetto del presente volume.

In fig. 1-2 sono disposti vari materiali in ordine di resistenza decrescente da un ottimo isolante, il polistirene, al conduttore più usato, il rame.

Verrà spiegato in seguito il significato e l'uso del Germanio impuro.

CAPITOLO II

ELEMENTI SEMICONDUTTORI

2-1. La conduzione per eccesso e per difetto di elettroni.

Il principio basilare della teoria dei semiconduttori è costituito dal fatto che gli elettroni possono condurre la corrente in due modi diversi: uno noto col nome di « conduzione per eccesso di elettroni » o semplicemente « conduzione per mezzo di elettroni », e l'altro noto col nome di « conduzione per difetto » o « conduzione per mezzo di lacune ».

Il fatto che questi due processi avvengano contemporaneamente ma indipendentemente in un semiconduttore, permette di spiegare il funzionamento del transistore.

Gli elementi semiconduttori per eccellenza, cioè il silicio ed il germanio, si chiamano « cristalli covalenti », perchè gli atomi sono uniti fra loro per mezzo di legami con coppie di elettroni, legami formati dagli elettroni di valenza, cioè dagli elettroni che ruotano sul più esterno degli strati possibili.

Questi elementi, che nel sistema periodico si trovano a far parte del IV gruppo, hanno i numeri atomici rispettivamente 32 per il germanio e 14 per il silicio. Tali numeri corrispondono alla carica del nucleo atomico, misurata in unità di carica elettrica. Un atomo neutro ha pertanto una carica nucleare di $+ z\, e$, circondato da z elettroni, ciascuno di carica $- e$.

Gli elementi di cui ci occupiamo, il silicio ed il germanio, hanno valenza 4. Benchè essi possiedano in complesso rispettivamente 14 e 32 elettroni periferici, soltanto quattro di essi sono in grado di reagire chimicamente e questi sono i 4 elettroni che ruotano sullo strato più esterno.

Gli altri sono tanto strettamente vincolati al nucleo, da produrre un « nocciolo ionico » stabile, il quale presenta la carica netta $+ 4$.

Questo nocciolo si può considerare come completamente inattivo, per quanto riguarda i processi elettronici, nelle reazioni chimiche dei semiconduttori.

Comportamento del tutto analogo presenta il carbonio, che viene qui considerato in quanto costituisce un esempio classico di struttura cristallina, molto comoda per la trattazione.

Ciascun atomo tende a formare legami covalenti, o a coppia di elettroni, con altri 4 atomi. Questa tendenza è soddisfatta completamente nella struttura del diamante, che è la forma cristallina classica di tutti questi elementi.

Per facilitare la trattazione della conduttività in questo cristallo, la struttura atomica è rappresentata in figura 2-1 con un modello bidimensionale, anzichè tridimensionale, come invece è in realtà.

Fig. 2-1 – Rappresentazione piana della struttura atomica del diamante. (I legami covalenti sono rappresentati dalle linee).

Ogni atomo di carbonio forma un legame mediante una coppia di elettroni con 4 atomi adiacenti. Il cristallo è elettricamente neutro, e, sulla base di questa struttura a legami di valenza, si può intuitivamente comprendere perchè il diamante sia un coibente.

Benchè contenga un gran numero di elettroni, come un metallo, il legame covalente è una struttura completamente diversa dal legame metallico.

Parlando dei legami metallici, si dice frequentemente che i portatori di carica si possono immaginare come un gas di elettroni liberi, che produce una nube di carica negativa uniforme, in cui fluttuano gli ioni positivi del metallo.

Nel caso del diamante, invece, gli elettroni si possono paragonare piuttosto ad elementi strutturali che tengono assieme il cristallo. In un cristallo ideale, perfetto, ogni legame di valenza contiene i suoi 2 elettroni: pertanto ogni elettrone è strettamente legato ed impossibilitato a partecipare al processo di conduzione.

Una conduttività si può però produrre nel diamante, in parecchi modi, ognuno dei quali comporta una alterazione nella perfezione della struttura con legame di valenza.

Per esempio, se particelle ad alta energia, o quanti di radiazione, o fotoni, vengono a cadere sul cristallo, essi possono spezzare i legami.

In figura 2-2 è schematizzato un fotone il quale cede la sua energia ad un elettrone, che viene espulso da uno dei legami.

Questo elettrone espulso costituisce una carica negativa localizzata nel cristallo, come si vede in figura 2-3, mentre prima che essa venisse creata, in quella parte del cristallo, la struttura con legame a coppia di elettroni era elettricamente neutra.

Un elettrone di questo genere, che rappresenta un di più rispetto a quelli necessari per completare la struttura di collegamento fra atomo e atomo, rappresenta un « elettrone in eccesso ».

Siccome non può entrare a far parte di nessuno dei legami già completi, è costretto a migrare nel cristallo, sotto l'influenza dell'agi-

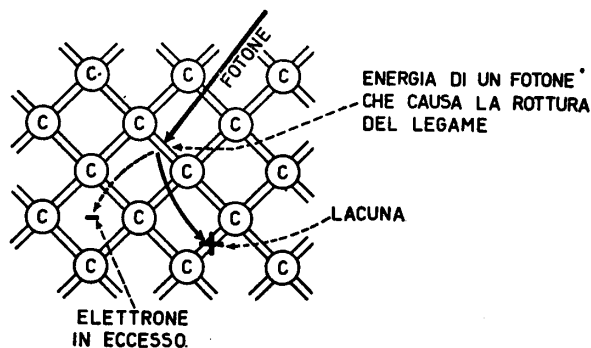



Fig. 2-2 – Creazione di una coppia elettrone-lacuna in seguito all'assorbimento dell'energia ceduta da un fotone.

tazione termica. Se viene applicato un campo elettrico, l'elettrone in eccesso tende a dirigersi nella direzione della forza su di esso esercitata, ed a condurre quindi una corrente.

Il processo di conduzione per mezzo di elettroni in eccesso viene indicato semplicemente col nome di conduzione per mezzo di elettroni.

Il fotone che ha creato l'elettrone in eccesso, cedendogli la sua energia, ha però spezzato un legame di valenza.

Quando l'elettrone è stato espulso, nel legame è rimasto un difetto, un buco, o, come si dice comunemente, una « lacuna », dovuta alla mancanza dell'elettrone espulso. Questa lacuna costituisce una carica positiva, localizzata nel cristallo, come si vede in figura 2-4, mentre, prima che essa venisse introdotta, il cristallo era elettricamente neutro.

Il suo movimento ha luogo in senso inverso a quello dell'elettrone. Sotto l'influenza di un campo elettrico, il moto disordinato della lacuna assume una direzione determinata, ed anch'essa può contribuire ad una conduzione di corrente.

È forse necessario chiarire il concetto di moto della lacuna.

Come si è visto, la lacuna si è formata per l'espulsione di un elettrone che è stato eccitato. La lacuna quindi non è altro che il posto lasciato vacante dall'elettrone. Questo posto vacante può però venir occupato da un altro elettrone che transiti nelle vicinanze, e che venga attratto dalla carica positiva della lacuna stessa. Siccome però, nel caso in esame, del diamante, non sono presenti elettroni liberi, ma esclusivamente elettroni di valenza, è evidente che l'elettrone che andrà a saturare la lacuna, sarà per forza di cose un elettrone di valenza, il quale abbandonerà l'orbita dell'atomo su cui stava ruotando, per passare

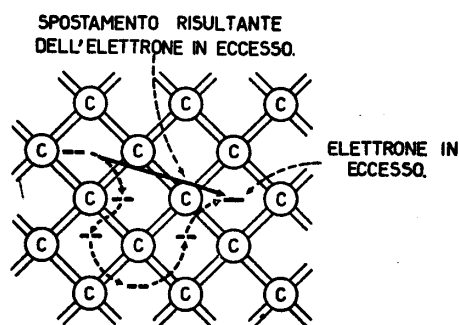



Fig. 2-3 – Moto disordinato di un elettrone in eccesso.

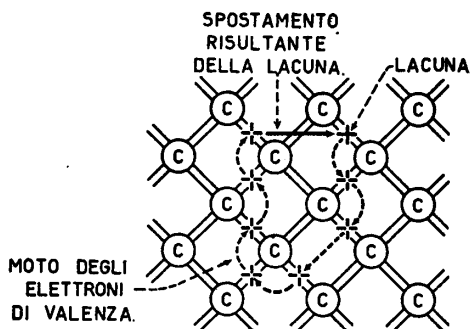



Fig. 2-4 – Moto disordinato di una lacuna.

sull'orbita dell'atomo mancante di un elettrone. Con questo passaggio l'elettrone ha sì colmato la lacuna, ma ne ha creata un'altra nell'atomo contiguo. Praticamente si può dire che la lacuna si è spostata dall'uno all'altro atomo. Siccome questo processo si ripete continuamente, si può parlare di un moto della lacuna.

Il processo di conduzione ora descritto viene indicato col nome di conduzione per mezzo di lacune.

In figura 2-5 è rappresentato il flusso di corrente in un cristallo di diamante colpito da radiazioni luminose. Gli elettroni e le lacune, prodotti a coppie dai fotoni, si muovono in direzioni opposte, sotto l'azione del campo elettrico applicato. Gli elettroni, essendo negativi, si spostano in direzione opposta al campo, ma la corrente da essi prodotta ha, naturalmente, lo stesso senso del campo.

Le lacune invece, avendo carica positiva, producono una corrente concorde al campo.

Se la sorgente luminosa viene asportata, il fenomeno ha termine ed il cristallo ritorna allo stato normale. Ciò accade perchè elettroni e lacune si ricombinano fra loro e la struttura cessa di essere perturbata. Quando infatti avviene l'incontro fra un elettrone ed una lacuna, entrambi scompaiono, ed i legami strutturali ridiventano completi, mentre l'energia in eccesso viene assorbita dagli atomi sotto forma di vibrazioni termiche.

Il fenomeno della formazione di coppie lacuna-elettrone, in seguito all'assorbimento di energia luminosa, prende il nome di fotoconduttività.

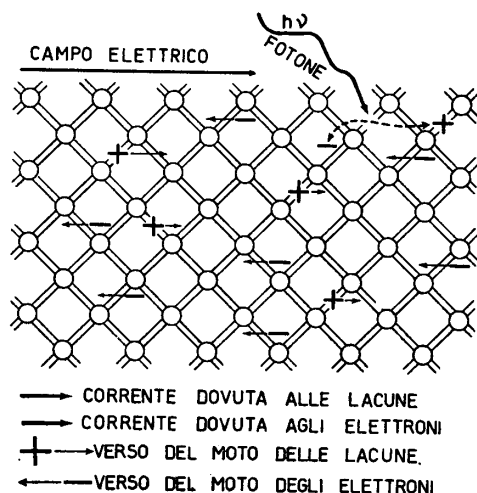



Fig. 2-5 – Fenomeno della fotoconduttività.

Sulla base della teoria della meccanica quantistica, si è trovato che esiste una grande analogia fra il comportamento degli elettroni e quello delle lacune.

Una lacuna si può immaginare come una particella carica positivamente, che si sposta attraverso il cristallo e che presenta quasi lo stesso comportamento di un elettrone libero, salvo per quanto riguarda il segno della carica.

È evidente l'importante distinzione che esiste fra il comportamento degli elettroni che sono stati eccitati e quindi espulsi dai legami di valenza della struttura, e quelli che invece vi sono rimasti.

Come si vedrà in seguito, nel cap. III, secondo la teoria delle bande energetiche, gli elettroni nella banda di valenza occupano una serie di livelli energetici che coprono una certa banda di energie possibili. Nel cristallo ideale tutti questi livelli energetici sono occupati, e la banda dei livelli energetici prende il nome di « banda completa », « banda dei legami di valenza », o semplicemente « banda di valenza ».

È impossibile, per un elettrone, avere un'energia più elevata di quella corrispondente allo stato più alto nella banda di valenza, a meno che esso non riceva un aumento di energia, sufficiente a trasformarlo in elettrone libero, o elettrone in eccesso, del tipo visto in precedenza.

Gli elettroni che si trovano negli stati liberi, possono anche avere varie energie di moto e dar luogo così ad un complesso di livelli energetici della « banda incompleta » o « banda di conduzione ».

Le due bande, di valenza e di conduzione, sono separate da una regione di energie « proibite », per la quale non esistono livelli energetici possibili per gli elettroni, nel cristallo.

Se la temperatura è sufficientemente elevata, avvengono rotture spontanee dei legami covalenti, per agitazione termica, che producono elettroni e lacune in ugual numero.

Nel diamante ciò avviene a temperature elevatissime, mentre per il germanio ed il silicio si osserva quest'effetto anche a temperatura ambiente.

2-2. Elementi semiconduttori inquinati.

Studiare la conduttività di un semiconduttore sarebbe cosa oltremodo difficile, se elettroni e lacune fossero sempre presenti nella medesima quantità, come nel caso trattato nel paragrafo precedente. Fortunatamente è possibile avere dei casi, sia nel germanio che nel silicio, in cui la conduttività è dovuta o solo agli elettroni in eccesso o solo alle lacune.

Se la conduttività è dovuta agli elettroni in eccesso, si dice che il materiale in esame è di tipo n, perchè i portatori di corrente agiscono come cariche negative, se è dovuta a lacune, si dice che il materiale è di tipo p, perchè i portatori di corrente agiscono come cariche positive.

Se un cristallo semiconduttore fosse perfettamente puro, cioè se tutti gli atomi costituenti il cristallo fossero fra loro uguali, l'unica conduttività possibile sarebbe quella dovuta alla creazione di coppie lacuna-elettrone per agitazione termica o altra eccitazione. In tal caso il semiconduttore non sarebbe nè di tipo n nè di tipo p (1).

Ad un semiconduttore che presenti la caratteristica di non essere nè di tipo n nè di tipo p, si dà il nome di « semiconduttore intrinseco ».

Si faccia attenzione a non confondere un semiconduttore intrinseco con un semiconduttore puro. Si può avere, in determinate circostanze, un semiconduttore intrinseco tutt'altro che puro.

Per ottenere un semiconduttore di tipo n, bisogna fornirgli degli elettroni in eccesso; per ottenere un semiconduttore di tipo p, bisogna fornirgli delle lacune.

Questo scopo viene raggiunto semplicemente sostituendo uno o più atomi dell'elemento semiconduttore, il quale appartiene sempre al IV

---

(1) Va notato per inciso che in un cristallo del genere si osserverebbe una leggera conduttività di tipo n. Ciò è dovuto al fatto che la mobilità degli elettroni non è uguale a quella delle lacune, però conviene per il momento trascurare questo fenomeno, non essenziale ai fini della trattazione.

gruppo della tavola periodica degli elementi, ed è pertanto tetravalente, con altrettanti atomi di elementi, appartenenti al V gruppo, se si vuole ottenere il tipo *n*, ed al III gruppo, se si vuole invece ottenere il tipo *p*.

Un semiconduttore nella cui struttura si sono operate delle sostituzioni di alcuni atomi con atomi di elementi estranei, si dice drogato o inquinato.

La fig. 2-6 mostra un esempio di silicio tipo *n*.

La conduttività è in tal caso dovuta alla presenza di atomi di arsenico, che vengono chiamati « impurità », anche se sono stati aggiunti deliberatamente nel silicio puro. I metodi con i quali vengono eseguite in pratica queste aggiunte, sono descritti nella II parte (drogaggio).

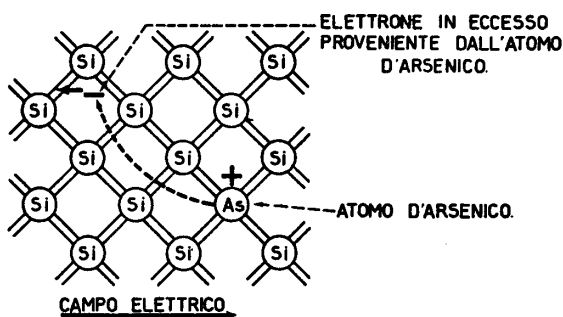



Fig. 2-6 – Conduttività di tipo *n*, dovuta ad elettroni in eccesso, in un campione di silicio drogato con arsenico.

L'atomo di arsenico possiede 5 elettroni di valenza, che circondano un nucleo avente una carica + 5. Ora, ogni atomo di arsenico aggiunto si sostituisce ad uno degli atomi di silicio nella struttura cristallina e forma quattro legami covalenti con gli atomi di silicio adiacenti, impegnando 4 dei suoi 5 elettroni di valenza. Il quinto elettrone non può sistemarsi in alcuno dei 4 legami, e pertanto rimane libero di muoversi nel cristallo. Come si è già visto nel paragrafo precedente, questo elettrone in eccesso costituisce una carica negativa mobile e localizzata. L'atomo di arsenico invece, costituisce una carica positiva *immobile* e localizzata. Infatti il suo nucleo, con una carica di + 5, non è neutralizzato dal complesso (— 4) della carica nei legami di valenza. La carica netta del nucleo però, bilancia esattamente quella dell'elettrone in eccesso introdotto nel cristallo dall'atomo di arsenico.

Gli atomi di impurità, come l'arsenico, aggiungono elettroni in eccesso, ma non alterano il carattere elettricamente neutro del cristallo. Gli elettroni, negativi, vengono attratti dagli atomi, positivi, di arse-

nico, ed a temperature sufficientemente basse, rimangono legati ad essi, sia pure debolmente.

A temperatura ambiente però, l'agitazione termica fa allontanare l'elettrone in eccesso dal suo nucleo, lasciandolo libero di errare per il cristallo.

Un semiconduttore di tipo *p* è visibile in figura 2-7.

In questo caso l'impurità aggiunta, boro, ha valenza 3, e pertanto non può saturare completamente la struttura a legami di valenza che la circonda. Resta infatti vacante il posto di un elettrone, cioè si crea una lacuna. Un elettrone di un legame adiacente può occupare il posto vacante del legame B-Si, ed in tal caso la lacuna si sposta. Per successive sostituzioni di elettroni di valenza fra un atomo e l'altro, si ottengono successivi spostamenti della lacuna da atomo ad atomo, cioè si ha la presenza di una lacuna, libera di errare nel cristallo.

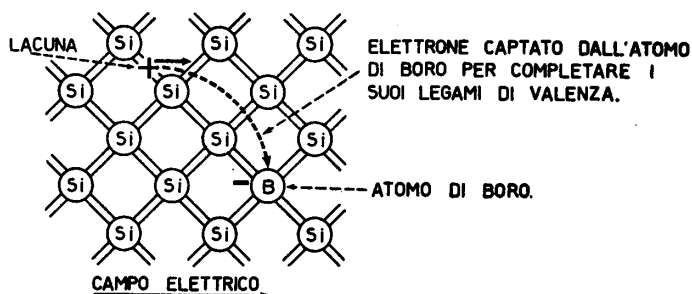



Fig. 2-7 – Conduttività di tipo *p*, dovuta a lacune, in un campione di silicio drogato con boro.

L'atomo di boro costituisce una carica negativa, *immobile*, localizzata.

Data la simmetria fra il comportamento delle lacune e quello degli elettroni, si può definire la situazione illustrata in figura 2-7, dicendo che l'atomo negativo di boro attrae la lacuna, positiva, ma che, a temperatura ambiente, l'agitazione termica la fa allontanare dal suo nucleo, lasciandola libera di errare e di contribuire alla conduttività del cristallo.

Abbiamo considerato due esempi di due tipi di impurità, l'arsenico pentavalente ed il boro trivalente. La scelta di questi due elementi è stata fatta a puro titolo di esempio, allo scopo di fissare le idee su di un caso concreto, ma molti altri elementi possono venire impiegati con uguale successo. La caratteristica tipica del semiconduttore « inquinato » mediante aggiunte di impurità, è determinata esclusivamente dalla va-

lenza dell'elemento scelto come impurità. Come si è già detto, gli elementi del V gruppo della tavola periodica dànno luogo ad un semiconduttore di tipo n, cioè ad un semiconduttore in cui la conduttività è dovuta esclusivamente ad elettroni in eccesso, mentre gli elementi del III gruppo dànno origine ad un semiconduttore di tipo p, cioè ad un semiconduttore in cui la conduttività è dovuta esclusivamente alle lacune.

Le impurità appartenenti al V gruppo, pentavalenti, vengono indicate col nome di «impurità donatrici», perchè esse «donano» al cristallo un elettrone in eccesso.

Le impurità appartenenti al III gruppo, trivalenti, vengono indicate col nome di «impurità ricettatrici», perchè esse catturano, «ricettano» un elettrone da un'altra parte del cristallo, per completare la struttura dei legami di valenza con gli atomi adiacenti.

Nella tabella seguente sono riassunti tutti i termini fino ad ora trattati.

Tipo di conduttività	Tipo n	Tipo p
Conduzione per mezzo di	elettroni (in eccesso)	lacune
Banda energetica entro la quale si verifica lo spostamento dei portatori di carica ..	banda di conduzione	banda di valenza
Segno del portatore di carica	negativo	positivo
Valenza dell'atomo di impurità	5	3
Nome dell'atomo di impurità	donatore	ricettatore
Impurità più comunemente impiegate	fosforo P arsenico As antimonio Sb	boro B alluminio Al gallio Ga indio In

Può essere utile illustrare come il numero dei portatori di carica dipenda dalla temperatura. Un esempio è riportato in figura 2-8; si tratta di un campione di silicio inquinato con 5 donatori e 2 ricettatori.

Premettiamo che i portatori di carica indipendenti dalla temperatura, saranno 3, e tutti e tre saranno elettroni.

Infatti i 5 donatori introducono nel cristallo 5 elettroni in eccesso, mentre i 2 ricettatori vi introducono 2 lacune. Le lacune però verranno senz'altro saturate da 2 dei 5 elettroni in eccesso, i quali di conseguenza, si ridurranno a 3.

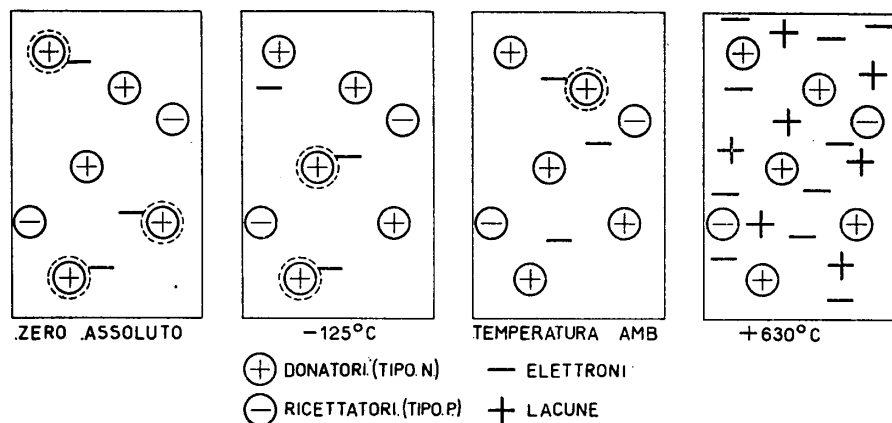



Fig. 2-8 – Densità di lacune ed elettroni in funzione della temperatura in un campione di silicio di tipo *n*.

Alla temperatura dello zero assoluto tutti e tre gli elettroni sono legati ai rispettivi nuclei.

Alla temperatura di — 125 °C l'agitazione termica è sufficiente ad allontanare gli elettroni in eccesso dai loro donatori, però la ricombinazione è talmente rapida, che in media solo un elettrone su tre rimane libero per la conduzione.

Alla temperatura ambiente (+ 25 °C) la velocità di ricombinazione è molto minore, per cui in media rimangono liberi per la conduzione 2 elettroni su 3. I legami di valenza però resistono validamente all'agitazione termica e non vengono spezzati.

Man mano che la temperatura viene fatta salire, l'agitazione termica riesce a spezzare alcuni legami di valenza e si creano quindi coppie elettroni-lacune.

Alla temperatura di + 630 °C il numero di portatori di carica prodotti dall'agitazione termica è 6 volte superiore a quelli dovuti alle impurità, il cui effetto è pertanto trascurabile.

Il cristallo ha praticamente la medesima conduttività che avrebbe se fosse perfettamente puro.

2-3. Conduttività ed effetto Hall.

La conduttività di un semiconduttore contenente lacune ed elettroni, dipende dal numero dei portatori di carica presenti e dalla facilità con cui essi sono in grado di muoversi, sotto l'azione di un campo elettrico applicato E. Quest'ultima proprietà prende il nome di « mo-

bilità », e viene definita come la velocità di una particella, in centimetri al secondo, in un campo elettrico di un volt per centimetro. Le dimensioni della mobilità sono pertanto $cm^2 \cdot volt^{-1} \cdot sec^{-1}$.

Indicando con μ_n e μ_p rispettivamente le mobilità degli elettroni e delle lacune, e con u_n ed u_p le velocità statistiche medie degli elettroni e delle lacune corrispondenti al campo E applicato, si ha:

$$\mu_n = \frac{u_n}{E} \qquad \text{e} \qquad \mu_p = \frac{u_p}{E}$$

Per il germanio:

$$\mu_n = 3600 \text{ cm}^2 \text{ volt}^{-1} \text{ sec}^{-1}$$

e

$$\mu_p = 1700 \text{ cm}^2 \text{ volt}^{-1} \text{ sec}^{-1}.$$

La conduttività, in Ω^{-1} cm^{-1}, dovuta agli elettroni in eccesso, è uguale alla carica totale per volume unitario, in coulombs cm^{-3}, degli elettroni che sono liberi di muoversi, moltiplicata per la mobilità.

La carica totale è pari alla densità degli elettroni, in cm^{-3}, moltiplicata per la carica di un elettrone ($e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ coulombs).

Analogo ragionamento si può fare per quanto concerne la conduttività dovuta alle lacune.

Combinando gli effetti dovuti ai due tipi di portatori di carica, si ottiene la seguente equazione per la conduttività:

$$\sigma = e\,(n\,\mu_n + p\,\mu_p) \tag{2-31}$$

in cui: n = densità degli elettroni in eccesso;
p = densità delle lacune;
μ_n = mobilità degli elettroni;
μ_p = mobilità delle lacune.

Al salire della temperatura, si verifica un aumento ad andamento esponenziale del numero delle coppie lacuna-elettrone generate termicamente per unità di volume. Per il germanio questa densità di coppie di portatori di carica, N_i, che prendono il nome di portatori intrinseci, è data dalla seguente relazione:

$$N_i = 4{,}5 \times 10^{19} \cdot e^{-\frac{4390}{T}} \tag{2-32}$$

dove T è la temperatura assoluta.

A temperatura ambiente ($T = 300$ °K) $N_i = 1{,}7 \times 10^{13}$.

Si vede quindi che, al di sopra di una certa temperatura, i portatori intrinseci diventano talmente numerosi, che la conduzione dovuta alle impurità può venir trascurata. Questa temperatura prende il nome di « temperatura intrinseca » ed ha un valore maggiore per il germanio più fortemente inquinato, e che presenta pertanto una bassa resistività.

In un materiale perfettamente puro, il numero degli elettroni generati per via termica uguaglia esattamente il numero delle lacune, in modo che $n = p = N_i$. Però, siccome gli elettroni presentano una mobilità maggiore delle lacune, la conduttività predominante è di tipo n.

La misura della sola conduttività fornisce solamente *una* relazione fra le quattro quantità incognite presenti nell'equazione (2-31).

Per fortuna, però, si può ottenere un'altra relazione fra queste stesse quattro quantità, misurando l'effetto Hall.

L'effetto Hall ha luogo quando ad un campione, percorso da una corrente, viene applicato un campo magnetico trasversale. In tali condizioni, al campo elettrico longitudinale, normalmente presente, si aggiunge un campo trasversale. La risultante di questi due campi non è più parallela alla direzione della corrente, e questo effetto origina una tensione misurabile fra due punti diametralmente opposti del campione in esame.

Per chiarire le idee, analizziamo separatamente il comportamento delle lacune e quello degli elettroni in una barretta di materiale semiconduttore percorso da una corrente I, al quale venga applicato un campo magnetico H perpendicolare alla direzione della corrente (vedi fig. 2-9). In generale, su di una particella di massa m e di carica e, che si muove con velocità v in un campo magnetico H, agisce una forza $\overline{F} = e\,\overline{v} \wedge \overline{H}$, che tende ad incurvare la traiettoria della particella.

Facciamo l'ipotesi che le singole particelle non siano dotate di velocità propria, supponiamo cioè che il loro moto sia dovuto esclusivamente ai campi applicati (tale ipotesi è lecita, perchè in media la velocità propria di ogni particella è nulla); ciò equivale a pensare ad una particella inizialmente ferma, che comincia a muoversi sotto l'azione del campo elettrico e del campo magnetico applicati, seguendo la traiettoria circolare che le compete, fino a che non entra in collisione con un'altra particella, la quale la ferma di colpo; dopo di che il processo si ripete fino alla prossima collisione, e così via.

Come è schematizzato in figura 2-9, ogni particella percorre una serie di archi di cerchio, tutti della medesima curvatura (in media).

Una lacuna, positiva, si muove nella direzione del campo elettrico E, viene deviata dal campo magnetico H, e, seguendo le curve tratteggiate

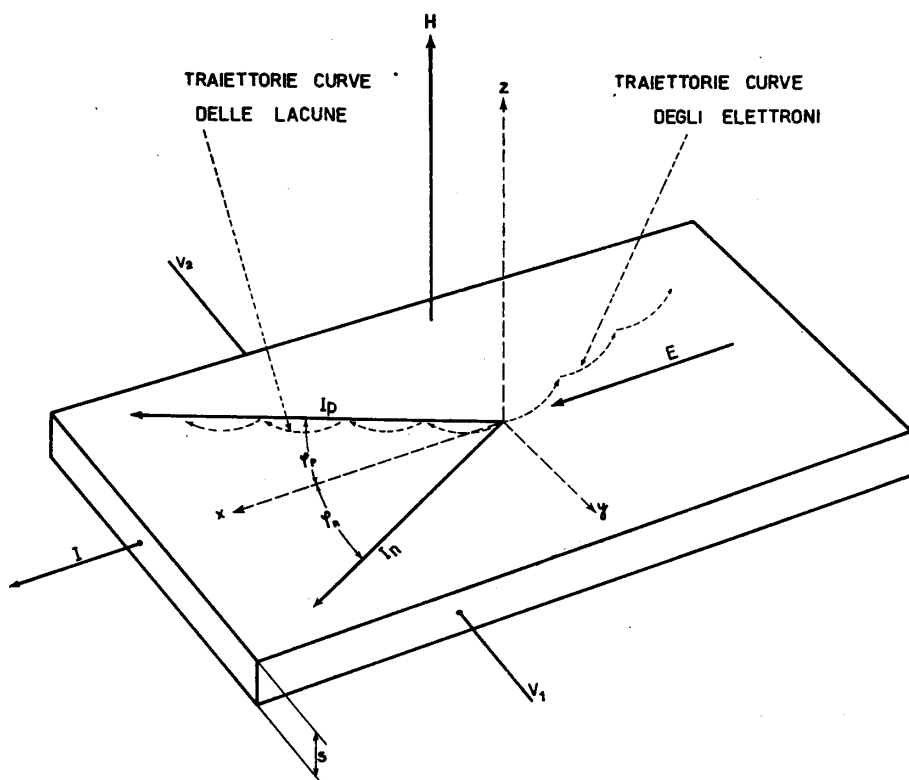



Fig. 2-9 – Correnti di elettroni e di lacune dovute all'azione dei campi elettrico e magnetico applicati.

in figura, determina una corrente I_p, che forma un angolo φ_p con la direzione del campo elettrico applicato.

Un elettrone, negativo, si muove invece in direzione opposta al campo elettrico E, ma viene deviato dal campo magnetico H nello *stesso* senso di una lacuna. Infatti, siccome la forza dovuta al campo magnetico è proporzionale al prodotto della velocità per la carica della particella, e quest'ultima è di segno opposto a quello della lacuna, la deviazione risultante ha la medesima direzione.

Anche l'elettrone si muove seguendo delle curve come quelle tratteggiate in figura, però la corrente I_n che esso determina, ha ovviamente il verso opposto a quello del suo moto, e forma pertanto un angolo φ_n con la direzione del campo elettrico applicato.

Questa è la situazione in condizioni di regime. Durante il transitorio iniziale, mentre il campo magnetico viene a formarsi, una corrente

trasversale scorre effettivamente nel campione, e trasporta delle cariche da un lato all'altro.

Queste cariche si accumulano sulle due facce opposte, rendendole una positiva e l'altra negativa, e creando il campo elettrico trasversale. Una volta raggiunte le condizioni di equilibrio, questo campo elettrico trasversale bilancia esattamente l'effetto di deflessione del campo magnetico, e non si verifica un'ulteriore accumulazione di carica sulle superfici.

Pertanto la corrente riprende a fluire longitudinalmente, ed il campo elettrico presenta una componente trasversale.

Il coefficiente di Hall viene di solito misurato rilevando la tensione prodotta dal campo trasversale fra 2 punti opposti del campione; il suo valore è dato dalla formula:

$$R = 10^8 \frac{V \cdot s}{H \cdot I} \tag{2-33}$$

dove: $V = |(V_2 - V_1)|$ è la tensione trasversale in volt;
s è lo spessore della barretta in cm;
H è l'intensità del campo magnetico, in gauss;
I è l'intensità di corrente, in ampere.

I due angoli di deviazione, φ_p e φ_n, possono essere facilmente ottenuti dalle seguenti equazioni:

$$\varphi_p = e\,\tau_p \frac{H}{m\,c} = \mu_p \frac{H}{c} \tag{2-34}$$

$$\varphi_n = e\,\tau_n \frac{H}{m\,c} = \mu_n \frac{H}{c} \tag{2-35}$$

dalle quali è possibile risalire alla valutazione di μ_p e μ_n.

Ecco quindi che la misura dell'effetto Hall fornisce una relazione fra le quantità incognite della formula (2-31).

Allora, se si effettuano le misure su di un campione di tipo n, nel campo di temperatura per cui si ha la conduttività dovuta alle sole impurità, si può benissimo porre $p = 0$.

In tali condizioni, le misure della conduttività e dell'effetto Hall permettono una determinazione separata di n e di μ_n.

Nello stesso modo si possono determinare separatamente p e μ_p in campioni di tipo p. Combinando i dati ottenuti per i due tipi di se-

miconduttore esaminato, si può trovare l'andamento di μ_n e di μ_p in funzione della temperatura.

Una volta noti i valori di μ_n e di μ_p è possibile ottenere quelli di n e di p anche nei casi in cui sono simultaneamente presenti lacune ed elettroni.

2-4. Tempo di vita.

Un altro elemento che caratterizza un semiconduttore e la cui conoscenza è di capitale importanza, è il tempo di vita dei portatori minoritari. L'argomento viene qui esposto brevemente in linea teorica, mentre la descrizione dell'apparecchiatura impiegata e dei metodi usati per eseguire le misure è sviluppato nella seconda parte (cap. X).

Definiamo anzitutto i portatori minoritari.

Col nome di portatori minoritari in un semiconduttore si indica il tipo di portatori di carica che costituiscono meno del 50% del numero totale di portatori presenti. Così in un campione di tipo n, i portatori minoritari sono costituiti dalle lacune, mentre in un campione di tipo p, sono costituiti dagli elettroni in eccesso.

Un semiconduttore in equilibrio termico possiede una ben determinata concentrazione di lacune e di elettroni. Questa concentrazione può però venir variata, iniettando nel campione dei portatori minoritari, per mezzo, ad esempio, di un contatto puntiforme, oppure creando coppie elettrone-lacuna mediante impulsi luminosi, raggi X o forti campi elettrici.

Quando in un semiconduttore si trovano presenti portatori in eccesso, il sistema tende a riportarsi nelle condizioni di equilibrio, ricombinando fra loro lacune ed elettroni.

Si è osservato che, se in un campione di tipo n vengono iniettate ad impulsi regolari, piccole quantità di lacune, queste scompaiono con legge esponenziale, ricombinandosi con gli elettroni in eccesso, presenti nel materiale.

Cioè, detto N_0 il numero di lacune iniettate all'istante t_0, il numero di lacune ancora presenti dopo il tempo t è:

$$N_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}} \tag{2-41}$$

τ_p è il tempo di vita medio di una lacuna, e può venir definito dicendo che esso rappresenta la quantità di tempo richiesta dall'impulso applicato per ridursi ad $\frac{1}{e}$ del suo valore iniziale.

Un analogo fenomeno avviene per l'iniezione di elettroni in un semiconduttore di tipo *p*.

I valori normali del tempo di vita dei portatori minoritari nel germanio di entrambi i tipi variano da qualche microsecondo a parecchie centinaia di μsec.

2-5. Leghe semiconduttrici.

Già da alcuni anni, negli Stati Uniti si stanno facendo degli studi, per ottenere le proprietà semiconduttrici, manifestate dagli elementi germanio e silicio, anche da speciali leghe binarie e ternarie. È questo un argomento d'avanguardia, sul quale poco trapela dai vari laboratori di ricerca in cui si svolgono gli studi. Si conoscono oggi solamente i principi teorici che presiedono al comportamento di tali composti.

Benchè nell'impiego delle leghe si riscontrino inizialmente difficoltà molto superiori a quelle normalmente incontrate nella lavorazione degli elementi puri, i vantaggi offerti da tali composti sono talmente notevoli, da incitare i ricercatori ad insistere nella loro fatica.

Le leghe più comunemente impiegate sono le leghe binarie fra elementi del III e del V gruppo della tavola periodica degli elementi, presenti entrambi col medesimo numero di atomi.

Ora, ogni atomo dell'elemento del III gruppo possiede tre elettroni di valenza; ogni atomo dell'elemento del V gruppo possiede cinque elettroni di valenza; siccome i due tipi di atomi sono in numero uguale, *in media* si avranno quattro elettroni di valenza per atomo, cioè si avrà una struttura simile a quella di un elemento del IV gruppo.

Si comprende pertanto il motivo per cui queste leghe presentano caratteristiche semiconduttrici.

L'enorme vantaggio che esse offrono rispetto agli elementi puri è che, usando diverse combinazioni fra gli elementi dei due gruppi, si può ottenere una vasta gamma di energie proibite, cioè l'intervallo energetico fra banda di valenza e banda di conduzione può, entro certi limiti, venir fatto variare in modo notevole. Ciò è dovuto al fatto che il legame fra un atomo del III gruppo (fornito cioè di 3 elettroni di valenza) ed uno del V gruppo (fornito di 5 elettroni di valenza) non è un vero e proprio legame covalente, ma piuttosto un legame eteropolare. La forza del legame è in tal caso più elevata, e di conseguenza l'intervallo di energie proibite è più ampio.

Con gli elementi puri, invece, non è possibile intervenire in alcun modo su questo parametro.

Tutti questi composti presentano inoltre un alto valore della mobi-

lità, sia degli elettroni che delle lacune, valore senz'altro paragonabile a quello degli elementi puri.

La struttura cristallina è cubica, cioè la stessa del diamante, salvo per quanto riguarda la diversità fra gli atomi dei due elementi.

La conduttività di tipo *p* o di tipo *n* viene anche in questo caso ottenuta per sostituzione di alcuni atomi componenti la struttura, con altrettanti atomi, di valenza inferiore o superiore di un'unità a quella dell'atomo sostituito. In generale si produce una lega di tipo *n*, sostituendo atomi del V gruppo con atomi del VI, mentre una lega di tipo *p* richiede la sostituzione di atomi del III gruppo con atomi del II.

Se, per esempio, nella lega più usata e meglio nota, In Sb, un atomo di antimonio viene sostituito da un atomo di tellurio, si hanno 6 elettroni di valenza, dei quali solo 5 sono necessari per completare i legami strutturali. L'elettrone in più è libero di vagare, e di condurre pertanto una corrente. Il composto presenta una conduttività dovuta ad elettroni in eccesso, ed è pertanto di tipo *n*.

Se invece, sempre nella lega In Sb, si sostituisce un atomo di indio con uno di zinco, si hanno solo 2 elettroni di valenza, mentre, per completare i legami strutturali, ne occorrerebbero 3. Si forma quindi una lacuna, che fornisce una conduttività di tipo *p* al composto.

Fra le leghe ternarie, che si cominciano ora a studiare, citiamo le calcopiriti, di cui è un esempio il composto $AgInTe_2$. Il principio di funzionamento è lo stesso delle leghe binarie; infatti, fra gli elettroni di valenza degli atomi dei tre elementi, la media è quattro (1 per l'Ag; 3 per l'In; 12 per il Te_2).

Il composto presenta anch'esso la struttura cristallina del diamante, e sembra che le sue caratteristiche siano ottime, però non c'è ancora alcun dato ufficiale in merito.

CAPITOLO III

ELEMENTI DI MECCANICA QUANTISTICA

3-1. Introduzione.

La meccanica quantistica è un argomento troppo vasto ed irto di difficoltà, per poter venire sviscerato a fondo in questa sede; siccome però alcuni concetti di meccanica quantistica sono indispensabili per una buona comprensione degli argomenti che formeranno l'oggetto dei capitoli successivi, vengono ora esposte le definizioni e le formule principali, spiegati i concetti base, ed enunciati i principi fondamentali di tale materia.

Partendo dall'equazione di Schroedinger, si definiscono le funzioni d'onda; successivamente vengono introdotti i concetti di « spin » e di stato quantico, e si enunciano il principio di esclusione del Pauli ed i teoremi dell'ampiezza di banda e di conservazione degli stati quantici. Entrando nel campo dei semiconduttori, viene esaminato il punto fondamentale del loro comportamento, cioè l'esistenza delle 3 bande energetiche.

Da ultimo vengono considerati i livelli energetici che competono ai donatori ed ai ricettatori. Il capitolo riuscirà in parte incomprensibile a chi non ha già almeno qualche cognizione in merito, ma ciò è purtroppo inevitabile, dato che questo è un argomento che non si presta assolutamente ad una trattazione in forma elementare.

3-2. Equazioni d'onda.

Le leggi di moto di un elettrone, in uno spazio a 3 dimensioni, sono governate dall'equazione d'onda di Schroedinger:

$$\frac{h^2}{8\,\pi^2\,m}\left(\frac{\partial^2\,\psi}{\partial\,x^2}+\frac{\partial^2\,\psi}{\partial\,y^2}+\frac{\partial^2\,\psi}{\partial\,z^2}\right)+(\mathcal{E}-U)\,\psi=0 \qquad (3\text{-}21)$$

in cui h = costante di Planck;
m = massa dell'elettrone;
$\mathcal{E}$ = energie « possibili » dell'elettrone (indipendenti dalla sua posizione);
U = $U(x, y, z)$ = energia potenziale del campo che influenza il moto dell'elettrone;
ψ = $\psi(x, y, z)$ = funzione d'onda incognita;
x, y, z = coordinate che determinano la posizione dell'elettrone.

Per esempio, in un atomo di idrogeno, la funzione U dell'energia potenziale per un elettrone, è definita dicendo che l'energia è nulla quando l'elettrone è a distanza infinita dal nucleo. Di conseguenza $U = -\frac{e^2}{r}$, dove e è la carica dell'elettrone, ed r la distanza dal nucleo.

Quando nell'equazione di Schroedinger si introduce questo valore dell'energia potenziale, al posto della funzione U, si possono ottenere delle soluzioni per ψ, che soddisfino alle condizioni ai limiti (nel nostro esempio $\psi = 0$ per r che tende all'infinito) *solamente per alcuni valori di* $\mathcal{E}$. Queste soluzioni si chiamano « funzioni naturali », e le energie corrispondenti prendono il nome di « energie naturali ». Ogni funzione di onda può venir definita mediante una serie di 3 numeri quantici.

Nel campo della meccanica quantistica, la funzione d'onda ψ viene definita come una « ampiezza di probabilità », ed il quadrato del suo valore assoluto, $|\psi|^2 = |\psi^2|$ è una « densità di probabilità ».

La densità di probabilità ha il seguente significato: l'elettrone, nella sua funzione d'onda, va immaginato come una piccolissima particella, di dimensioni trascurabili se paragonate a quelle dell'atomo. Da solo esso non oltrepassa il volume occupato dalla funzione d'onda, però, durante il suo moto, attraversa lo spazio attorno all'atomo, impiegando, in ciascuna regione, quantità di tempo variabili.

La densità di probabilità in ogni punto è semplicemente proporzionale alla quantità di tempo, per volume unitario, in cui l'elettrone si trova presente in un piccolo volume, nell'intorno del punto considerato.

Infatti, il fattore scalare della funzione d'onda è tale che, generalmente, $|\psi|^2 dV$ rappresenta semplicemente la frazione di tempo durante il quale l'elettrone rimane nel volumetto dV.

Di conseguenza $|\psi|^2 dV$ rappresenta la probabilità di trovare l'elettrone nel volume dV. ψ ha le dimensioni di $\text{cm}^{-\frac{3}{2}}$.

Quando queste probabilità vengono estese a tutto lo spazio, la loro somma dà ovviamente l'unità, perchè l'elettrone deve per forza trovarsi in qualche posto. Una funzione d'onda estesa all'unità è detta normalizzata.

Di conseguenza, $|\psi^2|$ fornisce la distribuzione della densità di carica media nel tempo prodotta da un elettrone, e questa densità di carica media equivale agli strati possibili di un elettrone nel modello atomico di Bohr.

In molti casi è lecito supporre che l'elettrone si sposti con una rapidità tale da consentire, nei calcoli, l'impiego della media stessa.

In accordo con la teoria di Planck, un elettrone non può possedere un valore qualunque di energia, ma soltanto valori ben determinati, i quali possono differire fra loro per una quantità minima, data da $E = hf$.

Pertanto, data la distribuzione dell'energia, per gli elettroni entro il campo di influenza del nucleo, non si può parlare di energia in generale, ma bisogna sempre riferirsi ad un « livello energetico », cioè ad un valore fisso e ben definito dell'energia, valore che sarà sempre dato da un numero intero, moltiplicato per hf.

3-3. Spin e stati quantici.

L'elettrone, oltre ad un movimento di traslazione nello spazio, è fornito anche di un movimento rotatorio attorno al proprio asse. Questa rotazione introduce un quarto grado di libertà, quindi un quarto numero quantico, lo « spin ».

La teoria della relatività ha permesso di stabilire che questo numero quantico può presentare due soli valori ammissibili, indicati con $+\frac{1}{2}$ e $-\frac{1}{2}$.

Lo spin dell'elettrone produce anche un momento magnetico, ma, per quanto riguarda lo studio del moto degli elettroni nei semiconduttori, interessa qui soltanto il fatto che lo spin fornisce all'elettrone un grado di libertà in più, e di conseguenza questo si può muovere, in accordo con una data funzione d'onda, sia con lo spin positivo che con lo spin negativo.

Si può a questo punto introdurre il concetto di stato quantico. « Uno stato quantico descrive un modo possibile di comportamento di un elettrone. Esso è definito stabilendo i suoi 4 numeri quantici, dei quali 3 descrivono la funzione d'onda, ed il quarto lo spin ».

Tutto ciò riguarda il comportamento di un singolo elettrone.

Quando sono presenti contemporaneamente parecchi elettroni, i quali esercitano reciprocamente forze di repulsione elettrostatica, non

è più esatto pensare che ciascun elettrone si muova in un campo di valore costante, e quindi non è più esatto parlare di stati quantici per i singoli elettroni, ma bisogna invece considerare lo stato quantico per tutto il sistema, considerato come un assieme. Però, quando gli elettroni sono presenti in gran numero, si possono usare alcuni metodi approssimati. Così, dovendo prendere in esame un solo elettrone, si può considerare l'effetto degli altri come una media, che fornisce un campo di forze, il quale può venir supposto fisso e definito.

È in questo campo di forza media che si studia il moto dell'elettrone e si determina il suo stato quantico. Lo stesso procedimento può venir ripetuto per tutti gli altri elettroni.

Per il grado di approssimazione usato nella teoria dei semiconduttori, si può ritenere soddisfacente l'ipotesi dell'influenza del campo di forze medio, ed il comportamento di ciascun elettrone può venir descritto semplicemente specificando lo stato quantico da esso occupato.

3-4. Principio di esclusione del Pauli.

Il principio di esclusione del Pauli stabilisce semplicemente che due elettroni non possono occupare lo stesso stato quantico.

Se non esistesse tale legge di natura, tutti gli elettroni, negli atomi complessi, scenderebbero al livello energetico più basso, e non esisterebbe più alcuna diversità fra i vari elementi, e di conseguenza non si avrebbero più nemmeno le varie sostanze.

Nell'applicare il principio di esclusione del Pauli, bisogna distinguere bene fra stato quantico e stato quantico. Due elettroni, appartenenti a due atomi diversi, possono benissimo trovarsi entrambi in un determinato stato quantico di data energia, ognuno però nell'ambito del proprio atomo. Così, se in un particolare atomo di idrogeno, un elettrone si trova nello stato quantico di energia più bassa, un altro elettrone qualsiasi può sempre trovarsi nel medesimo stato quantico, purchè appartenga ad un altro atomo di idrogeno.

Per esempio, in un gas formato da atomi di idrogeno, è logico supporre che, statisticamente, metà degli elettroni si trovino nello stato quantico più basso con lo spin di un segno, e metà nello stato quantico più basso con lo spin di segno opposto.

E ciò appare logico, se si pensa che, quando si hanno due atomi, gli stati quantici sono praticamente raddoppiati. Infatti le funzioni d'onda attorno ai 2 nuclei richiedono una nuova serie di numeri quantici. Si è trovato però che, se gli atomi sono abbastanza distanziati fra loro, le funzioni d'onda sono semplicemente le stesse che si avrebbero

per un atomo solo, ma duplicate, cioè una riferita ad un atomo, e l'altra riferita all'altro atomo.

In altre parole, due atomi distinti non possono avere gli « stessi » stati quantici; ciascuno di essi ha funzioni d'onda esattamente della stessa forma, le quali però sono situate nello spazio in punti diversi, e corrispondono a stati quantici distinti, una serie per ogni atomo.

3-5. Stati quantici e bande energetiche nei cristalli.

Supponiamo di avere una struttura cristallina composta da N_s atomi disposti con perfetta simmetria. La distanza reciproca degli atomi in questione sia però molte volte superiore a quella corrispondente alla normale costante reticolare, in modo che fra atomo e atomo non abbia luogo alcuna interazione.

La distribuzione degli stati quantici per il cristallo è in tal caso praticamente la stessa di un solo atomo, moltiplicata per N_s. Cioè ciascun livello energetico, corrispondente ad uno stato quantico atomico, si ripete N_s volte, una per il corrispondente stato quantico di ciascun atomo.

Ora però, immaginando di ridurre la costante reticolare, cioè di diminuire la distanza reciproca degli atomi costituenti il cristallo, la situazione cambia, e, quando gli atomi sono tanto vicini fra loro, da dar luogo ad una sensibile sovrapposizione delle funzioni d'onda fra gli atomi adiacenti, gli stati quantici e la distribuzione dei livelli energetici vengono modificati profondamente.

Man mano che le funzioni d'onda si sovrappongono, gli stati quantici non sono più limitati ai singoli atomi, ma si estendono a tutto il cristallo. In tal modo nel cristallo ogni livello energetico atomico si trasforma in una « banda » di livelli energetici o « banda energetica ». Ciò è illustrato in fig. 3-1.

Durante questo passaggio il numero degli stati quantici rimane invariato.

Per sistemi formati da grandi numeri di atomi, vi sono molte funzioni d'onda, e le energie, massime e minime, per le funzioni d'onda dell'elettrone, sono indipendenti dalle dimensioni della struttura, purchè questa contenga un gran numero di unità.

La conclusione ora raggiunta può venir sintetizzata in due teoremi, basilari per la teoria delle bande energetiche.

1) *Teorema dell'ampiezza di banda.*

L'ampiezza della banda energetica dovuta ad un livello energetico atomico è indipendente dal numero di atomi presenti nel cristallo.

2) *Teorema di conservazione degli stati quantici.*

Il numero degli stati quantici nella banda energetica è uguale al numero degli stati quantici atomici dai quali la banda è formata.

Non esistono stati quantici con valori di energia compresi fra le bande energetiche. Per questo motivo il campo energetico che va dall'estremità superiore di una banda all'estremità inferiore dell'altra, prende il nome di « banda di energie proibite » o « intervallo energetico ».

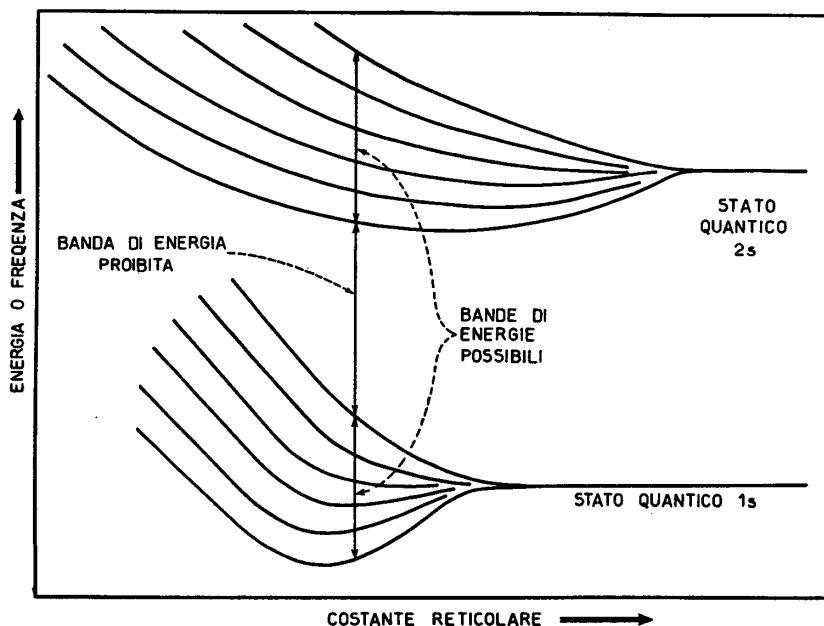



Fig. 3-1 – Livelli energetici (o frequenze) in funzione della costante reticolare.

Le bande energetiche contenenti stati quantici si chiamano invece « bande energetiche possibili », però se non c'è possibilità di equivoco, di solito vengono indicate semplicemente col nome di « bande energetiche », come è stato già fatto nell'enunciazione dei due teoremi.

Per il caso del carbonio, che maggiormente ci interessa, dato che questo elemento, come si è già osservato, presenta la stessa struttura cristallina del germanio e del silicio, le bande energetiche determinanti derivano dagli stati quantici occupati dagli elettroni di valenza. Questi sono indicati come stati 2 *s* e 2 *p* e contengono un totale di 8 stati quantici per atomo. Siccome negli atomi isolati gli elettroni di valenza sono 4, gli stati quantici risultano occupati solo per metà. Ogni atomo con-

tiene anche 2 elettroni nello stato 1 *s*, però questi elettroni hanno le loro funzioni d'onda legate al nucleo tanto fortemente, che non dànno luogo ad alcuna sensibile interazione fra gli atomi adiacenti, e la loro presenza può quindi venir trascurata.

Le bande energetiche per il carbonio nella struttura del diamante sono indicate in figura 3-2.

In corrispondenza a costanti reticolari ampie, la banda inferiore è completa e la superiore solo parzialmente completa, mentre in corrispondenza a costanti reticolari minori, gli otto stati per atomo sono

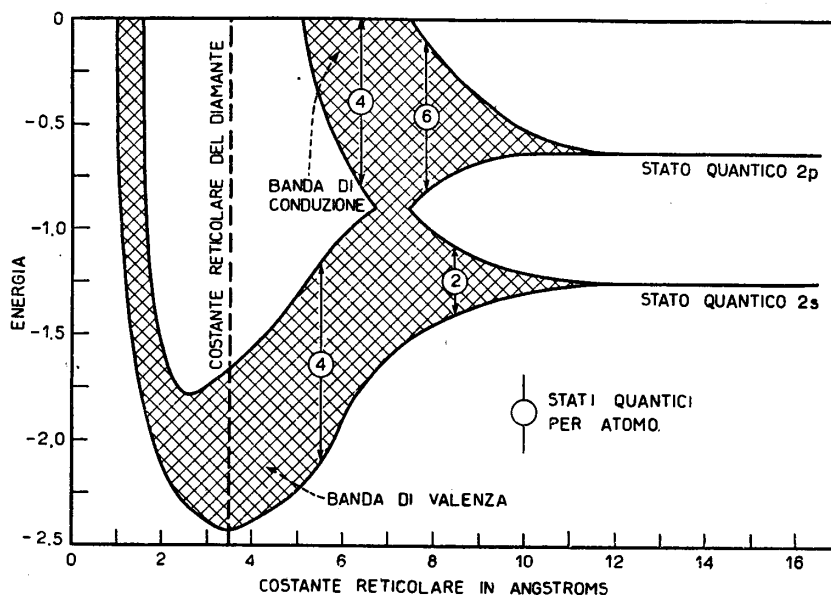



Fig. 3-2 – Bande energetiche per il diamante, in funzione della costante reticolare.

ugualmente suddivisi fra le due bande, in modo che la banda inferiore risulta totalmente completa. Questa banda inferiore corrisponde agli elettroni della banda di valenza. L'eccitamento di un elettrone richiede un'energia sufficiente a portarlo in uno stato quantico nella banda superiore. L'energia media di un elettrone nella banda inferiore della costante reticolare è molto minore di quella corrispondente agli atomi liberi. Questa diminuzione di energia è associata all'« energia di legame » del cristallo. Paragonando l'energia totale di un gruppo di atomi di carbonio isolati, con quella degli stessi atomi, disposti in modo da formare un cristallo, si vede che la perdita di energia degli elettroni di valenza rende questi ultimi molto più stabili.

3-6. Bande energetiche per metalli, isolanti e semiconduttori.

Per far passare un elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione, è necessario fornirgli una certa quantità di energia. Ciò equivale ad « eccitare » un atomo, cioè a spezzare il legame che tiene vincolato l'elettrone al suo nucleo. Questo elettrone « libero », possiede evidentemente un'energia superiore a quella che può competere, in generale, agli elettroni vincolati, cioè agli elettroni che si trovano nella banda di valenza.

Se pertanto si vuol fare un diagramma dei vari livelli energetici possibili per un elettrone, portando in ordinate il valore dell'energia (in volt-elettroni), si ha prima una banda di valenza che si estende fra 2 valori corrispondenti ai livelli energetici minimo e massimo degli elettroni di valenza, ciascuno caratterizzato dal suo stato quantico; successivamente si ha una zona, corrispondente a valori più elevati dell'energia, nella quale non esiste alcun stato quantico, si ha cioè la banda proibita; per valori ancora più elevati dell'energia si ha infine la banda di conduzione, per i cui livelli energetici esistono stati quantici corrispondenti agli elettroni liberi.

L'esistenza di queste tre bande energetiche, cioè della banda di valenza, della banda proibita e della banda di conduzione, è di importanza enorme. Infatti dall'ampiezza della banda proibita, che divide le altre due bande, dipendono moltissime proprietà elettriche di un materiale. È anzi addirittura possibile classificare conduttori, isolanti e semiconduttori, semplicemente indicando il valore dell'intervallo energetico della banda proibita.

In figura 3-3 sono schematizzati i tre casi in esame; la parte *A* si riferisce ad un semiconduttore, che presenta un certo valore di banda proibita (precisamente 0,7 volt-elettroni per il germanio ed 1,1 volt-elettroni per il silicio); la parte *B* si riferisce ad un isolante, la cui banda proibita è molto maggiore della precedente, all'incirca 15 volt-elettroni; la parte *C* mostra un conduttore, per il quale la banda proibita non esiste, ma si ha una sovrapposizione delle due bande, di valenza e di conduzione, per cui i legami di valenza possono esistere oppure no. Siccome un elettrone tende sempre a portarsi nel livello energetico libero più basso possibile, è evidente in che senso agisca una banda proibita; quanto più essa è ampia, tanto più difficile sarà per un elettrone acquistare l'energia necessaria per superarla e trasferirsi dalla banda di valenza, in cui si trova, alla banda di conduzione.

Se nella banda di conduzione ci sono pochissimi elettroni, o addirittura non ce ne sono affatto, il materiale è ovviamente un isolante;

se invece gli elettroni non devono acquistare energie grandissime per saltare da una banda all'altra, parecchi di essi possono raggiungere con relativa facilità la banda di conduzione, ed è questo il caso dei semiconduttori: se poi addirittura la banda proibita non esiste, nella banda di conduzione sarà sempre presente un grandissimo numero di elettroni, e quindi il materiale sarà un conduttore per definizione.

I donatori ed i ricettatori, di cui ci occuperemo nel paragrafo successivo, e che possono vincolare lacune ed elettroni, dànno luogo a livelli energetici che giacciono nella banda proibita.

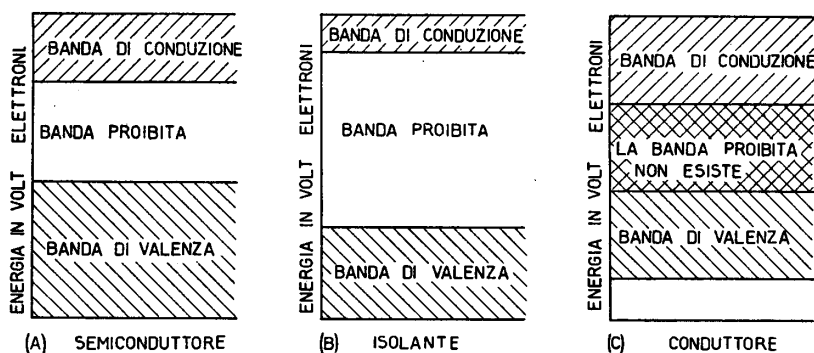



Fig. 3-3 – Paragone fra le bande di conduzione, bande proibite e bande di valenza per semiconduttori, isolanti e conduttori. Da notare la sovrapposizione delle bande per i conduttori, la ristretta banda proibita per i semiconduttori e l'ampia banda proibita per gli isolanti.

3-7. Livelli energetici dovuti alle impurità - Livelli per i donatori ed i ricettatori.

Un atomo di un elemento donatore, introdotto nella struttura cristallina di un semiconduttore, costituisce una carica positiva localizzata nella struttura, e vi introduce un elettrone extra che neutralizza questa carica, ma non può entrare a far parte della struttura a legami di valenza. Esso rimane pertanto nella banda di conduzione. Ora, un elettrone che si trovi in tale banda si comporta, nel cristallo, press'a poco nello stesso modo di un elettrone nello spazio libero, salvo per il fatto che l'elettrone nel cristallo può avere una massa effettiva diversa da quella di un elettrone nello spazio vuoto.

Infatti l'elettrone che si muove nella banda di conduzione presenta modi di moto attorno all'atomo di impurità molto simili a quelli di un elettrone nello spazio libero attorno al protone in un atomo di idro-

geno. In entrambi i casi si ha un fenomeno di attrazione elettrostatica fra la carica negativa dell'elettrone e la carica positiva del nucleo, con l'unica differenza che, nel caso dell'impurità donatrice, la carica positiva del nucleo si trova immersa in un mezzo dielettrico, mentre nel caso dell'atomo di idrogeno, il protone si trova nel vuoto. A causa della costante dielettrica e della polarizzazione del semiconduttore, la forza di attrazione esercitata dall'impurità donatrice sull'elettrone viene ridotta da e^2/r^2 a $e^2/K\,r^2$, in cui K è la costante dielettrica, e la carica dell'elettrone, ed r la distanza di separazione.

Di conseguenza le funzioni d'onda per l'elettrone, attorno alla impurità donatrice, sono uguali a quelle che si avrebbero per un atomo di idrogeno particolare, munito cioè di una carica nucleare effettiva molto minore.

La formula per l'energia che lega un elettrone al nucleo è data da:

$$2\,\pi^2\,m^*\,e^4\,Z^2/h^2 = 13{,}6\,Z^2 \text{ volt elettroni} \qquad (3\text{-}71)$$

in cui e = carica di un elettrone;
m^* = massa effettiva dell'elettrone;
h = costante di Planck;
Z = carica nucleare.

Per il caso dei semiconduttori, $Z = \dfrac{1}{k}$, e siccome k (costante dielettrica) è 11,9 per il silicio e 16,1 per il germanio, l'energia di legame risulta essere 0,10 volt-elettroni per il silicio e 0,05 volt-elettroni per il germanio.

Il raggio della funzione d'onda, cioè a dire dell'orbita dell'elettrone, viene pertanto moltiplicato per il fattore k, e diventa talmente grande, che si sovrappone a molti atomi, come si vede in figura 3-4.

Ora, ogni impurità donatrice toglie uno stato dalla banda di conduzione ed introduce uno stato quantico di energia più bassa.

Le impurità ricettatrici hanno invece effetto sugli stati nella banda di valenza. Questo tipo di impurità rappresenta una carica negativa localizzata nella struttura, e di conseguenza è in grado di attrarre una carica positiva. Una lacuna nella banda di valenza ha molti degli attributi di una carica positiva. La teoria della meccanica quantistica mostra che una lacuna, nella banda di valenza, oltre ad avere il comportamento di una carica positiva, per quanto riguarda l'effetto Hall e la conduttività, presenta modi di moto attorno all'impurità ricettatrice di un tipo del tutto analogo al moto di un elettrone attorno ad una impurità donatrice.

In conseguenza a ciò, alcuni degli stati nella banda di valenza vengono portati a livelli più alti per la presenza delle impurità ricettatrici.

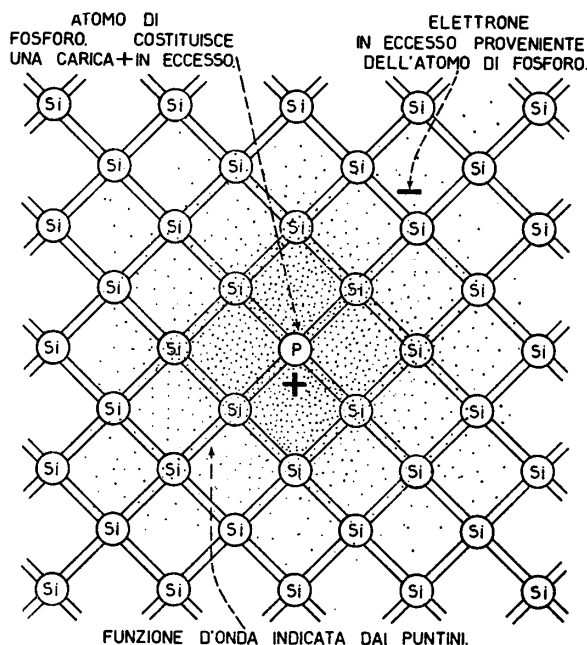



Fig. 3-4 – Funzione d'onda dell'elettrone legato all'atomo di fosforo nella struttura reticolare del silicio.

Nella figura 3-5 è schematizzato l'effetto di impurità ricettatrici e donatrici sulla distribuzione degli stati quantici. Viene considerato un volume unitario di materiale, in modo da identificare i numeri degli stati quantici con le densità. La banda di valenza presenta 4 N_s stati quantici, dove N_s è ancora il numero di atomi per volume unitario del cristallo. Ci sono poi N_d atomi donatori, i quali abbassano N_d stati dalla banda di valenza e dalla banda di conduzione, portandoli a livelli più bassi. Siccome lo spin può avere 2 valori, il numero di tali livelli risulta essere 2 N_d. Però bisogna tener presente il fatto che, se un elettrone si trova in uno stato quantico attorno ad uno degli atomi donatori, esso neutralizza quest'atomo, in modo che un altro elettrone non può venir attratto con la medesima energia di legame. Ciò significa che, praticamente, sono disponibili solo N_d stati e non 2 N_d.

Analogamente gli N_r atomi ricettatori tolgono N_r stati dalla banda di valenza, nella quale rimangono pertanto in definitiva $4 N_s — N_d — N_r$ stati quantici.

Come si vede nella figura (in *a*) gli stati N_d sono stati espulsi dalla banda di valenza al livello più basso. Le lettere per i livelli energetici hanno gli indici corrispondenti alla conduzione, donatori, ricettatori e legami di valenza.

Nei diagrammi (*b*), (*c*) e (*d*), i simboli + e —, circondati da un circoletto, rappresentano sia i livelli energetici che la carica netta dei donatori e dei ricettatori. La carica è definita per la situazione in cui la struttura di valenza è completa, e non sono presenti elettroni in eccesso.

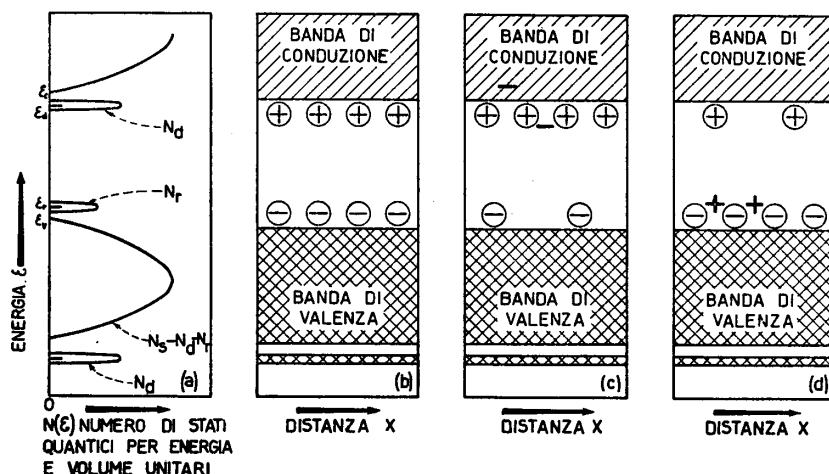



Fig. 3-5 – Diagrammi dei livelli di energia.

Per questo caso ciascun donatore rappresenta una carica positiva in eccesso. Il simbolo del donatore corrisponde all'energia con la quale il donatore può legare un elettrone, e si trova pertanto leggermente al di sotto della banda di conduzione.

In figura 3-5 (*c*) sono raffigurati gli elettroni nella banda di conduzione attratti dai donatori.

Analogamente le lacune, originate da elettroni sfuggiti dalla banda di valenza, vengono rappresentate da un segno positivo, e, siccome le lacune tendono ad occupare livelli più alti, nei diagrammi come quello di figura 3-5 (*d*) una lacuna vincolata ad un ricettatore può venir rappresentata da un segno + accanto al simbolo di un ricettatore.

Da queste definizioni risulta evidente che la neutralità elettrica per il diagramma in parola richiede che la somma delle cariche menzionate sia nulla.

CAPITOLO IV

CONTATTI FRA SEMICONDUTTORI E METALLI

4-1. Contatti raddrizzanti.

Se si realizza un semplice contatto fra un metallo ed un semiconduttore, e se tale contatto non viene assoggettato ad alcuna dissipazione di potenza, di nessun genere, esso prende il nome di « contatto non formato ».

Vediamo ora di analizzare il comportamento di un contatto di questo genere.

Siccome sulla superficie di un semiconduttore si trovano sempre presenti in una certa quantità elettroni in eccesso, secondo la teoria degli stati superficiali di Bardeen, la superficie del semiconduttore si trova ad un ben determinato potenziale.

Quando vengono messe a contatto fra di loro due superfici, una metallica ed una semiconduttrice, il potenziale negli stati superficiali di quest'ultima, viene mantenuto a causa dello scambio di elettroni che avviene sia con l'interno del semiconduttore che col metallo.

Ora, proprio in conseguenza della notevole densità di elettroni normalmente presenti negli stati superficiali, si verifica un fenomeno di repulsione di elettroni dalla regione prossima alla superficie, e questo fenomeno non interessa esclusivamente gli elettroni che si trovano nella banda di conduzione, ma anche alcuni elettroni appartenenti alla banda di valenza.

Per ogni elettrone di valenza respinto dagli elettroni dello stato superficiale, si verifica la creazione di una lacuna (corrispondente allo stato quantico non più occupato dall'elettrone espulso), per cui in definitiva, nelle immediate vicinanze del contatto metallico si viene a formare una concentrazione di lacune (vedi fig. 4-1 *a*).

Da ciò derivano le proprietà raddrizzanti di un contatto semiconduttore-metallo. Infatti il potenziale varia bruscamente in prossimità del contatto, formando una barriera, sia per gli elettroni, appartenenti al metallo e che tendono a penetrare nel semiconduttore, sia per le lacune presenti nel semiconduttore, che tendono a penetrare nel metallo.

Siccome la densità delle lacune in prossimità della superficie di contatto è molto maggiore della densità degli elettroni nell'interno del semiconduttore, la corrente diretta che scorre, dovuta ad un'opportuna differenza di potenziale applicata fra semiconduttore e metallo, sarà una corrente di lacune (fig. 4-1 *b*).

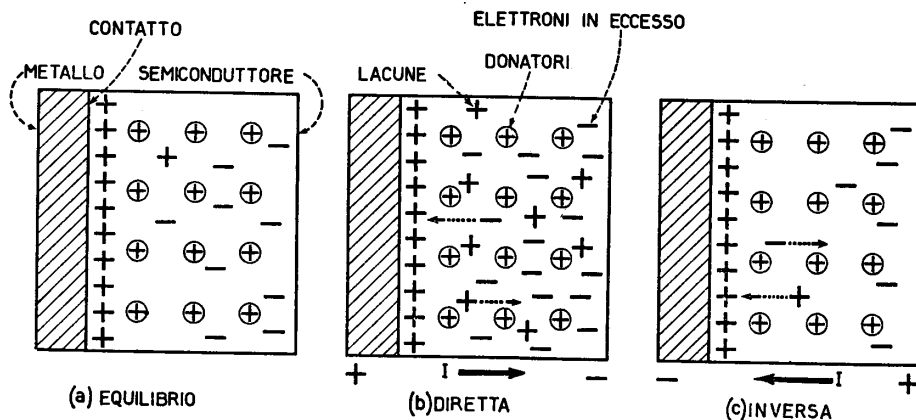



Fig. 4-1 – Comportamento di un contatto semiconduttore-metallo.

La corrente inversa è invece composta da elettroni e da lacune; precisamente dagli elettroni appartenenti al metallo che ricevono una energia termica sufficiente per passare dalla banda di valenza a quella di conduzione, e quindi penetrare nel semiconduttore, e dalle lacune che si formano termicamente nell'interno del semiconduttore, in zone prossime alla superficie di contatto.

È interessante osservare il fatto che una lacuna, la quale si avvicina al contatto semiconduttore-metallo, esercita una forza di attrazione sugli elettroni appartenenti al metallo, e ne facilita quindi la penetrazione nel semiconduttore. La presenza delle lacune favorisce pertanto il flusso di elettroni.

Si vede quindi come un contatto fra un metallo ed un elemento semiconduttore di tipo *n* dia luogo a delle proprietà rettificatrici per il

complesso così formato. Si potrebbe dimostrare che, facendo uso di un semiconduttore di tipo p, queste proprietà risultano molto ridotte.

4-2. Formazione di un contatto.

Le caratteristiche elettriche di un contatto metallo-semiconduttore vengono notevolmente migliorate assoggettandolo ad impulsi di corrente molto brevi, ma violenti.

Questi impulsi di corrente possono venir impressi in vari modi, ed avvengono nel senso inverso, cioè con il polo positivo al semiconduttore di tipo n, ed il polo negativo al metallo. Essi producono variazioni permanenti delle proprietà elettriche del contatto.

A questo procedimento si dà il nome di « formazione » elettrica.

I cambiamenti che si ottengono, sono dovuti in parte al trattamento superficiale del semiconduttore, ed in parte al materiale usato per il contatto puntiforme.

Da studi fatti da Bardeen e Pfann sulla formazione di contatti puntiformi ottenuti fra un filo di bronzo fosforoso ed una superficie di germanio, purificato per via chimica mediante attacco acido, si è potuto stabilire che la corrente di formazione determina una variazione dell'altezza della barriera di potenziale in senso opposto alla variazione che si verifica in seguito alla tensione applicata durante il processo di formazione.

Cioè, per fare un esempio, se durante la formazione il contatto puntiforme metallico è di segno negativo, in modo che la barriera di potenziale che gli elettroni devono superare per passare dal semiconduttore al metallo viene aumentata, allora quando la tensione di formazione viene tolta, la barriera risulta più bassa di quanto lo fosse stata prima della formazione del contatto.

In figura 4-2 sono schematizzati gli effetti dovuti al processo di formazione di un contatto puntiforme fra un filo metallico ed una superficie di un semiconduttore di tipo n.

In a è rappresentato il campo elettrico applicato durante la formazione, quando il metallo è reso positivo rispetto al semiconduttore, in b quando le polarità sono applicate in senso opposto.

Nella parte c della figura è visibile la distribuzione del potenziale lungo il complesso, prima che avvenga la formazione. In questo caso il contatto semiconduttore-metallo genera uno strato barriera determinato da una differenza di potenziale di valore φ, e dovuto in massima parte agli stati superficiali del semiconduttore, gli effetti della natura del contatto metallico essendo trascurabili.

In *d* è rappresentata la distribuzione del potenziale lungo il medesimo complesso, dopo che il processo di formazione ha avuto luogo, con passaggio di corrente dal metallo al semiconduttore, cioè in corrispondenza al caso *a*.

In *e* infine si ha la distribuzione del potenziale a formazione avvenuta nelle condizioni corrispondenti al caso *b*.

Risulta evidente l'effetto degli impulsi di corrente applicati, i quali generano una distribuzione del potenziale, sia fra il metallo ed il semi-

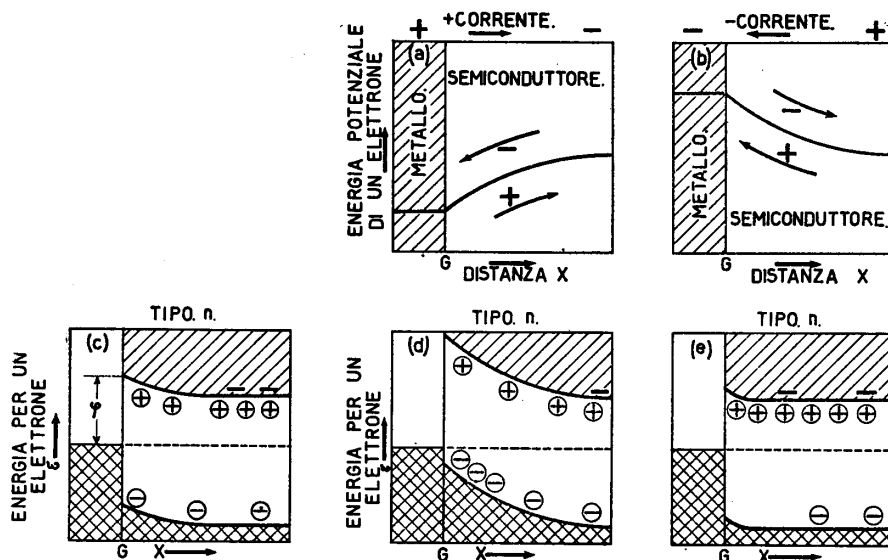



Fig. 4-2 – Interpretazione del fenomeno della « formazione ».

conduttore, che nell'interno di quest'ultimo, le cui variazioni permanenti rispetto al contatto non formato, sono opposte a quelle transitorie che si verificano durante il processo di formazione.

Questi effetti possono trovare una spiegazione soddisfacente, supponendo che durante la formazione, la temperatura ed il campo elettrico applicato siano talmente elevati da causare uno spostamento di impurità, e che queste impurità producano le variazioni del potenziale e della concentrazione di portatori di carica, come illustrato in figura 4-2 *d* ed *e*, che fanno variare φ in senso opposto a quello del potenziale applicato.

CAPITOLO V

GIUNZIONI

5-1. Definizione.

Lungo una barretta di germanio o di silicio si ha una giunzione, quando si verifica una variazione continua della concentrazione di donatori e di ricettatori, che dà luogo ad una graduale trasformazione del semiconduttore da tipo p a tipo n, o viceversa.

Se due pezzi di germanio o di silicio, aventi conduttività di tipo opposto, vengono portati semplicemente a contatto fra loro, non si riesce ad ottenere una giunzione vera e propria, a causa di strati ossidati, materiali estranei, o asperità che sono sempre presenti sulla superficie di separazione dei due elementi.

Il modo in cui vengono formate praticamente delle buone giunzioni, è descritto nella seconda parte (cap. XI).

In figura 5-1 è schematizzata una giunzione p-n ideale, in cui sono visibili le distribuzioni dei donatori, ricettatori, lacune ed elettroni.

In b si ha l'andamento della curva che rappresenta le densità rispettivamente dei ricettatori e dei donatori, ed in c quella delle lacune e degli elettroni.

La densità di carica netta (fig. 5-1 d),

$$\rho = e\,(p + N_d - n - N_r) \qquad (5\text{-}11)$$

in cui e = carica dell'elettrone;
p = densità delle lacune;
n = densità degli elettroni;
N_d = densità dei donatori;
N_r = densità dei ricettatori;

si ottiene facendo la differenza delle ordinate delle due curve precedenti.

Questa densità di carica netta dà luogo ad un dipolo, il quale a sua volta origina la distribuzione del potenziale elettrostatico (fig. 5-1 *e*).

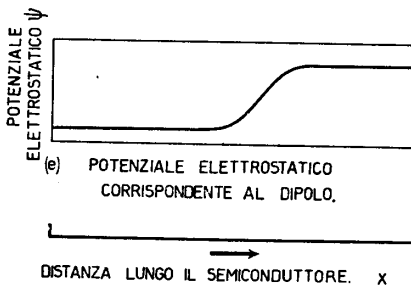
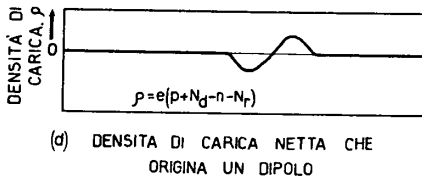
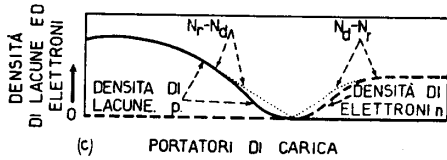
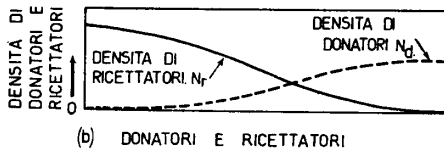
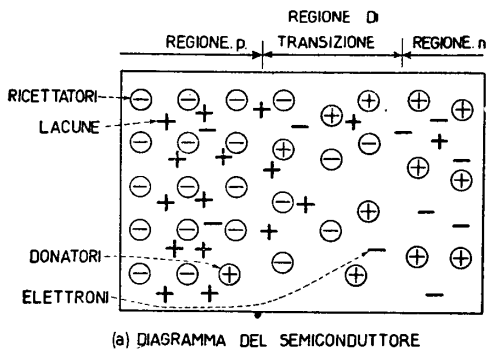



Fig. 5-1 – La giunzione *p-n*.

Siccome le lacune nella regione di tipo *p* hanno una concentrazione maggiore di quella degli elettroni nella regione di tipo *n*, esse tendono a diffondersi in quest'ultima, ma ne sono impedite dal potenziale elettrostatico, che rende la regione di tipo *n* più positiva e le permette di respingere le lacune e trattenere gli elettroni. Una discussione del tutto analoga vale per gli elettroni.

5-2. Comportamento e proprietà di una giunzione.

Prendiamo ora in esame la natura del flusso di corrente attraverso la giunzione quando vengono applicate delle tensioni esterne. In fig. 5-2 sono illustrati i 3 casi di interesse pratico, cioè la giunzione in equilibrio (*a*), polarizzata in senso diretto (*b*), e polarizzata in senso inverso (*c*).

Nelle condizioni di equilibrio, una parte delle lacune (*d*) possono acquistare un'energia sufficiente, a causa dell'agitazione termica, per superare il potenziale elettrostatico e diffondersi nella regione di tipo *n*. Una volta entrate in questa regione, si combinano con gli elettroni, dando luogo quindi ad una corrente. Tale corrente è però bilanciata esattamente dalle lacune generate termicamente nella regione *n* (e risultanti quindi da coppie lacuna-elettrone), le quali si diffondono attraverso la regione di transizione e penetrano nella regione di tipo *p*.

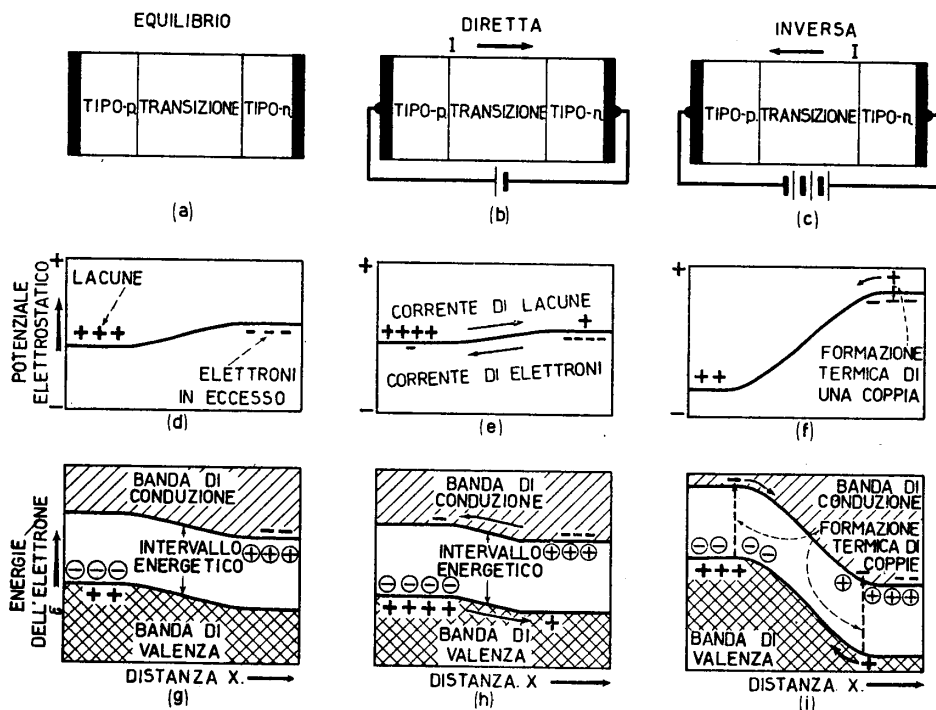



Fig. 5-2 – Distribuzione delle lacune, degli elettroni e dell'energia, in funzione della posizione, in una giunzione *p-n* con le polarizzazioni applicate.

Analogamente si hanno correnti di elettroni che si bilanciano pure fra loro.

Nelle condizioni di polarizzazione in senso inverso, alla regione di tipo *p* viene applicata una tensione negativa, in modo che il gradiente di potenziale nella regione di transizione risulta aumentato (*f*).

Per polarizzazioni di pochi decimi di volt o più, il gradiente risulta talmente forte, che solo un numero trascurabile di lacune riescono ad acquistare un'energia termica sufficiente a risalirlo, e pertanto la corrente di lacune *nella* regione *n* praticamente non ha più luogo. Invece la corrente di lacune *dalla* regione *n* resta praticamente la stessa che si aveva nelle condizioni di equilibrio (*d*).

Nella figura (*f*) l'origine di questa corrente è rappresentata dalla formazione, per agitazione termica, di una coppia lacuna-elettrone, seguita dalla diffusione della lacuna nella regione di tipo *p*, attraverso la regione di transito.

Questa corrente di lacune è indipendente dalla tensione applicata. È per questo motivo che la corrente inversa, dovuta alle lacune, si satura, cioè, all'aumentare della tensione inversa applicata, raggiunge un valore limite.

Un ragionamento del tutto analogo vale anche per il flusso di elettroni, ed è pure evidente che lo stesso gradiente che trattiene le lacune nella regione di tipo *p*, trattiene gli elettroni nella regione di tipo *n*, cioè la tensione inversa è tale sia per la corrente delle lacune che per quella degli elettroni.

Nelle condizioni di polarizzazione in senso diretto (*e*) il gradiente diminuisce e pertanto un'intensa corrente di lacune scorre verso la regione di tipo *n*.

Nelle figure (*g*), (*h*) e (*i*) sono illustrati i diagrammi delle bande energetiche nei 3 casi discussi.

Come si è già visto, un elettrone può venire asportato dalla banda di valenza e messo in moto nella banda di conduzione. Un tale elettrone si trova in uno stato eccitato e la sua energia è maggiore di quella che aveva nella banda di valenza.

Le lacune vengono invece a trovarsi a livelli energetici nella banda di valenza (ricordiamo che le lacune corrispondono a livelli *non* occupati da elettroni).

I donatori ed i ricettatori sono rappresentati da cariche positive e negative localizzate in corrispondenza ai livelli energetici che competono loro.

La tendenza degli elettroni ad occupare i livelli energetici più bassi, equivale alla tendenza delle lacune ad occupare i livelli energetici elettronici più elevati. Siccome nella meccanica quantistica è impossibile avere un elettrone eccitato a metà, vi è un intervallo di livelli energetici fra gli stati di valenza e quelli di conduzione, intervallo che, come si è visto, prende il nome di « banda proibita ».

La creazione di una coppia lacuna-elettrone per agitazione termica, corrisponde al salto di un elettrone attraverso l'intervallo energetico, come è mostrato in (*i*).

L'energia cinetica di moto dell'elettrone, lo porta ad energie più alte, nella banda di conduzione, mentre l'energia cinetica di moto della lacuna la porta ad energie più basse, nella banda di valenza.

Volendo spiegare in forma molto piana e semplice le proprietà rettificatrici e le proprietà di iniezione dei portatori di carica di una giunzione, si può ragionare nel modo seguente: quando la regione di tipo *p* viene resa positiva rispetto alla regione di tipo *n*, le lacune e gli elettroni vengono spinti gli uni incontro agli altri. Se, come avviene in

pratica, i portatori di tipo p sono i più numerosi, la maggior parte della corrente che attraversa la giunzione è dovuta alle lacune. Pertanto può scorrere una corrente intensa, e basta che la tensione sia sufficiente a determinare il moto di avvicinamento delle lacune e degli elettroni fra di loro.

Nella zona di giunzione si ha quindi una ricombinazione delle lacune con gli elettroni, il che permette appunto il passaggio di corrente nella direzione diretta.

Se invece la regione di tipo p viene resa negativa rispetto alla regione di tipo n, le lacune e gli elettroni vengono allontanati le une dagli altri, e la regione della giunzione rimane priva di portatori di carica, e risulta pertanto con la configurazione strutturale di un isolante. Si ha quindi una « barriera » per il flusso di corrente, che ne inibisce il passaggio nella direzione inversa.

5-3. Relazioni fra tensione e corrente per una giunzione p-n.

Facendo sempre riferimento alla fig. 5-1, si nota che nella regione di tipo n sono presenti delle lacune provenienti dalla regione di tipo p, ed analogamente nella regione di tipo p sono presenti degli elettroni provenienti dalla regione di tipo n.

Questo moto di cariche, dovuto all'agitazione termica, dà luogo ad un debole potenziale di contatto che contrasta, come abbiamo già visto, un'ulteriore diffusione. L'effetto di una tensione applicata attraverso ad una giunzione p-n è di disturbarne l'equilibrio, aumentando o diminuendo la diffusione, a seconda del segno della polarizzazione.

La relazione che lega fra loro tensione e corrente si può scrivere nella forma:

$$I = I_o\left(e^{\frac{eV}{KT}} - 1\right) = (I_{on} + I_{op})\left(e^{\frac{eV}{KT}} - 1\right) \qquad (5\text{-}31)$$

dove: K = costante di Boltzmann;
e = carica dell'elettrone;
T = temperatura assoluta della giunzione;
V = tensione applicata.

Per il germanio, a temperatura ambiente, si ha $I = I_o\left(e^{39V} - 1\right)$.

Le quantità I_{on} ed I_{op} rappresentano le densità delle correnti dovute rispettivamente agli elettroni ed alle lacune.

La forma della curva teorica, valida per tutti i valori di V (V positivo corrisponde alla tensione diretta, V negativo a quella inversa) è determinata esclusivamente dal termine esponenziale, mentre le proprietà particolari del germanio appaiono soltanto nell'altro termine, come si vedrà in seguito.

Il termine esponenziale dell'equazione (5-3 1) diventa trascurabile a tensioni inverse molto basse, di pochi decimi di volt per il germanio, e la corrente tende asintoticamente al valore dato dal termine $(I_{on} + I_{op})$, il quale è indipendente dalla tensione.

Questa corrente inversa costante è chiamata « corrente di saturazione » $I_o = I_{on} + I_{op}$.

Per una giunzione polarizzata in senso inverso, I_{on} è dovuta alla generazione termica di elettroni quali portatori minoritari nella regione di tipo p ed alla loro diffusione attraverso la giunzione, che li porta nella regione di tipo n polarizzata positivamente.

In modo del tutto analogo, I_{op} dipende dalla velocità di formazione e di diffusione delle lacune nella regione di tipo n.

I_{on} ed I_{op} dipendono dalle proprietà del germanio, secondo le equazioni seguenti:

$$I_{on} = \frac{K\,\sigma_i^2}{\sigma_p\,L_n} \qquad\qquad I_{op} = \frac{K\,\sigma_i^2}{\sigma_n\,L_p} \tag{5-32}$$

dove: σ_i = conduttività intrinseca;

K = fattore di proporzionalità $\dfrac{b}{(b+1)^2}$ in cui $b = \dfrac{\mu_n}{\mu_p}$;

σ_p = conduttività della regione di tipo p;

σ_n = conduttività della regione di tipo n;

L_n = distanza di diffusione per gli elettroni nella regione di tipo p;

L_p = distanza di diffusione per le lacune nella regione di tipo n.

NB: La distanza di diffusione è data da $L = (D\,\tau)^{\frac{1}{2}}$

dove: D = costante di diffusione;

τ = tempo di vita medio dei portatori minoritari.

Una giunzione presenta, come si vede dalla figura 5-3, ottime caratteristiche rettificatrici. Per ogni raddrizzatore la corrente inversa massima dipende dalla superficie effettiva della giunzione. In una giunzione polarizzata inversamente, si verificano campi elettrici molto intensi, fino a valori dell'ordine di 100 000 volt/cm.

Quando il campo elettrico però supera questi valori, si ha un'eccitazione spontanea dei portatori di carica, e la densità di corrente au-

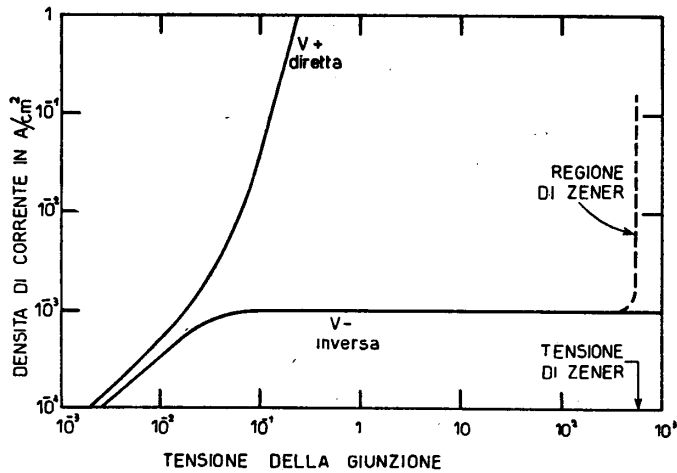



Fig. 5-3 – Curve teoriche della corrente in funzione della tensione per giunzioni *p-n*.

menta con estrema rapidità. Questo campo prende il nome di campo di Zener, e la corrente inversa ad esso dovuta, si chiama corrente di Zener.

CAPITOLO VI

TRANSISTORI

6-1. Generalità.

Fino ad oggi sono stati costruiti transistori di svariatissimi tipi e pertanto una classificazione si può fare in più modi.

Qui è stato scelto, come fattore determinante, il principio di funzionamento, e di conseguenza ne è derivata una classificazione che raggruppa tutti i tipi di transistori fino ad oggi costruiti, in 3 categorie, e precisamente:

1) Transistori a contatti puntiformi.
2) Transistori a giunzione.
3) Transistori ad effetto di campo.

Ogni categoria comprende un numero più o meno grande di tipi, i quali si differenziano fra loro per quanto riguarda le caratteristiche elettriche ed i campi di applicazione ed anche i procedimenti tecnologici adottati per la costruzione, ma non per quanto concerne il principio fisico che presiede al loro funzionamento.

Il primo a comparire, in ordine di tempo, è stato il transistore a contatti puntiformi, ma la sua vita non è stata molto lunga; oggi infatti la produzione di questo tipo è totalmente abbandonata, a favore dei vari tipi a giunzione, i quali offrono prestazioni superiori, sia per l'uniformità di caratteristiche, che per la relativa semplicità di costruzione.

Il transistore a giunzione si è rivelato il più conveniente per svariati motivi, fra i quali principalmente, oltre ai due citati, la possibilità di coprire una vastissima gamma sia di potenze che di frequenze.

Il transitore ad effetto di campo è ancora in fase sperimentale,

ma è fuor di dubbio che una produzione di questo tipo su scala industriale è ormai solo questione di tempo.

Nei paragrafi che seguono, vengono descritti i tre principi di funzionamento, e vengono riportate le caratteristiche salienti e le curve di maggior interesse per ciascuna categoria di transistori.

6-2. Transistori a contatti puntiformi.

Prima di affrontare questo argomento, una premessa è doverosa. La conoscenza dei fenomeni fisici che avvengono nell'interno di un transistore a contatti puntiformi, non si può considerare completa, e le varie teorie, tendenti a spiegarne adeguatamente il funzionamento, presentano sempre qualche punto debole.

Ciò è dovuto in parte alla complessità dell'argomento, ed alle difficoltà che si incontrano nel verificare sperimentalmente i risultati forniti dalla teoria, ed in parte al tempo relativamente breve che teorici e sperimentatori hanno avuto a disposizione per compiere i loro lavori, dato che la scoperta del transistore risale al 1948.

La spiegazione teorica del principio di funzionamento del transistore a contatti puntiformi, che viene qui di seguito sviluppata, è una delle tante emesse dai vari ricercatori, ed è forse quella più soddisfacente per la comprensione dei fenomeni che intervengono in un transistore di questo tipo, durante il suo funzionamento.

Va però tenuto presente che non esiste una certezza assoluta sulla veridicità di questa teoria, la quale, anche se soddisfa quasi completamente ai vari interrogativi che possono sorgere studiando il comportamento di un transistore, non ha ancora avuto una conferma definitiva, confortata dall'esperienza.

In figura 6-1 è schematizzato un transistore a contatti puntiformi con applicate le opportune tensioni.

La base è formata da una piastrina di germanio di tipo *n* ed i due reofori di emettitore (E) e di collettore (C) sono costituiti da due fili molto sottili di bronzo fosforoso, i quali toccano la superficie della piastrina di germanio in due punti molto prossimi fra loro.

I due contatti che si vengono così a formare fra ciascuno dei fili e la piastrina di germanio sono due contatti raddrizzanti (vedi paragrafo 4-1).

Al contatto dell'emettitore viene applicata una tensione diretta, cioè tale da polarizzarlo nel senso di bassa impedenza, mentre al contatto del collettore viene applicata una tensione inversa, che lo polarizza nel senso di alta impedenza.

Il motivo per cui l'emettitore deve essere formato da un filo molto sottile anzichè da un contatto qualsiasi è il seguente: come si è già visto al paragrafo 4-1, per creare delle lacune nel germanio (il che si ottiene spostando degli elettroni dalla banda di valenza alla banda di condu-

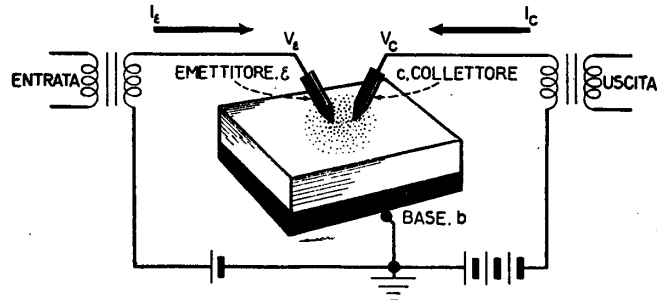



Fig. 6-1 – **Transistore a contatti puntiformi schematizzato. Notare le tensioni di polarizzazione applicate, ed i due trasformatori d'entrata e d'uscita, i quali hanno lo scopo, rispettivamente, di applicare un segnale all'emettitore e di ricavarlo, amplificato, al collettore.**

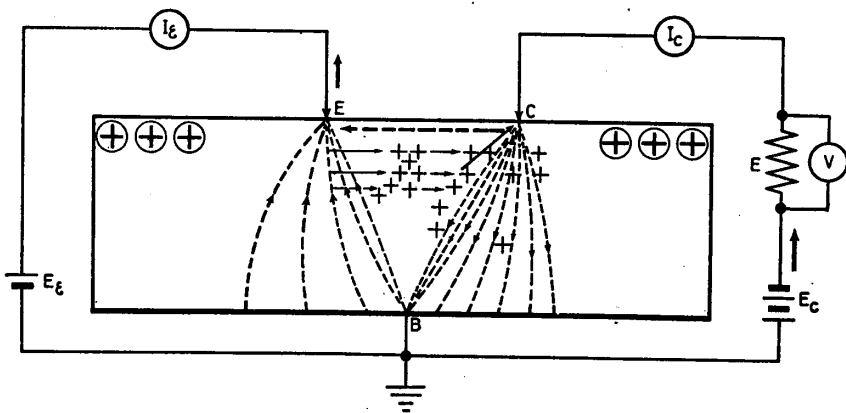



Fig. 6-2 – **Fenomeni che avvengono nell'interno di un transistore a contatti puntiformi, in seguito alla applicazione delle polarizzazioni.**

zione), è necessaria la presenza di un campo elettrico molto intenso; ora però tale intensità di campo non si può assolutamente ottenere applicando una tensione molto elevata al contatto emettitore-base, per il semplice motivo che il transistore non è in grado di sopportare la forte corrente che ne risulterebbe (va tenuto presente il senso di polarizzazione del contatto, che per l'emettitore è il senso diretto, di impedenza molto bassa).

Ricorrendo all'impiego di un contatto puntiforme è invece possibile ottenere un'elevata intensità di campo elettrico anche con tensioni molto modeste.

Chiarito questo punto, passiamo ad esaminare ciò che avviene quando si applica all'emettitore la tensione di polarizzazione E_ε. Per prima cosa, l'intenso campo elettrico che si viene a formare al punto di contatto, è in grado di spezzare alcuni legami di valenza e quindi di creare in ugual numero lacune ed elettroni liberi. Gli elettroni, sotto l'influenza del potenziale applicato, si dirigono immediatamente verso l'emettitore, uscendo dal germanio, mentre le lacune si spostano verso il collettore, tale spostamento essendo dovuto sia all'influenza del campo elettrico fra emettitore e collettore, sia alla normale diffusione degli elettroni.

Questa situazione è schematizzata in figura 6-2.

In definitiva quindi, dal contatto fra emettitore e base risulta una continua formazione di lacune che penetrano nel corpo del germanio. Il comportamento dell'emettitore, o meglio, l'effetto che esso provoca, ne spiega il nome.

Il corpo del transistore è formato da germanio di tipo *n*, quindi esistono nel suo interno elettroni liberi. Di conseguenza molte delle lacune che si sono create all'emettitore, e che si dirigono verso il collettore, incontrano sul loro cammino degli elettroni liberi, si ricombinano con essi, e pertanto cessano di esistere. Siccome queste ricombinazioni avvengono continuamente, il numero di lacune che si combinano con gli elettroni aumenta all'aumentare del tempo di transito, cioè del tempo impiegato dalle lacune per passare dall'emettitore al collettore; quindi conviene ridurre al minimo la distanza fra i due elettrodi, in modo da far sì che la frazione di lacune che si ricombinano con gli elettroni presenti nel germanio, sia la più ridotta possibile.

Nella regione del collettore, il flusso di corrente (inversa) è limitato dal gradiente di potenziale dovuto allo stato superficiale del germanio. Quando delle lacune, provenienti dall'emettitore, giungono nelle immediate vicinanze del contatto, esse tendono ad annullare questo gradiente, e di conseguenza un maggior numero di elettroni può scorrere attraverso il contatto stesso, e ne risulta quindi un aumento della corrente del collettore.

L'effetto transistore consiste appunto nella proprietà di ottenere un aumento della corrente del collettore in funzione dell'introduzione di lacune tramite l'emettitore.

Piccole variazioni dell'introduzione di lacune, ottenute modulando la corrente dell'emettitore mediante un segnale alternato, causano cor-

rispondenti variazioni della corrente del collettore, là quale riproduce la forma del segnale impresso.

Nelle figure 6-3 e 6-4 sono rappresentate due famiglie di curve caratteristiche per un tipo classico di transistore a contatti puntiformi.

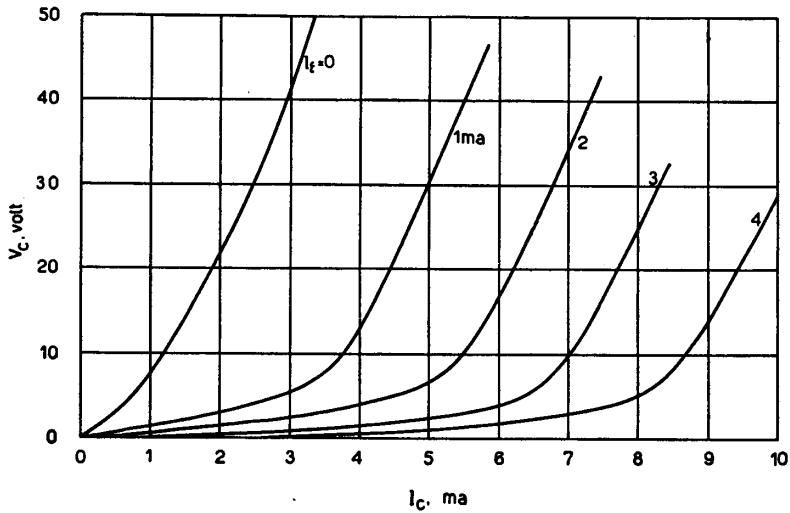



Fig. 6-3 – Caratteristiche fra tensione (V_c) e corrente (I_c) del collettore per un transistore a contatti puntiformi.

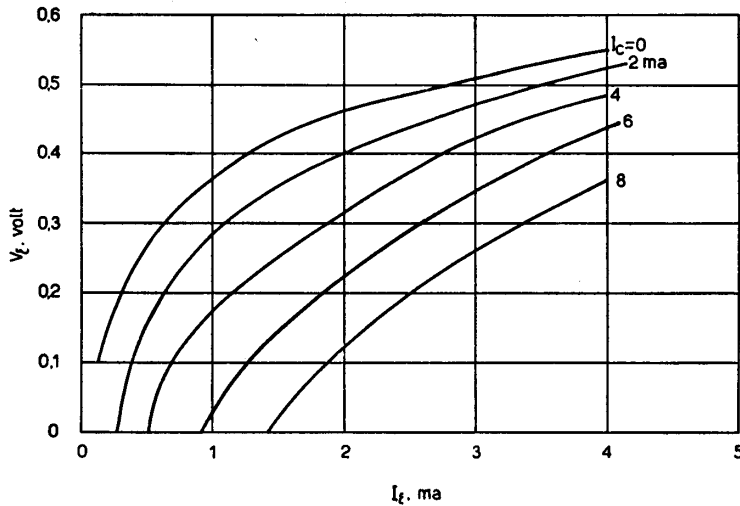



Fig. 6-4 – Caratteristiche fra tensione (V_ε) e corrente (I_ε) dell'emettitore per un transistore a contatti puntiformi.

6-3. Transistori a giunzione.

Questi transistori presentano una struttura che può venir schematizzata come in figura 6-5 e che consiste essenzialmente di due giunzioni *p-n*, le quali separano le due regioni di tipo *p*, P_ε e P_c dalla re-

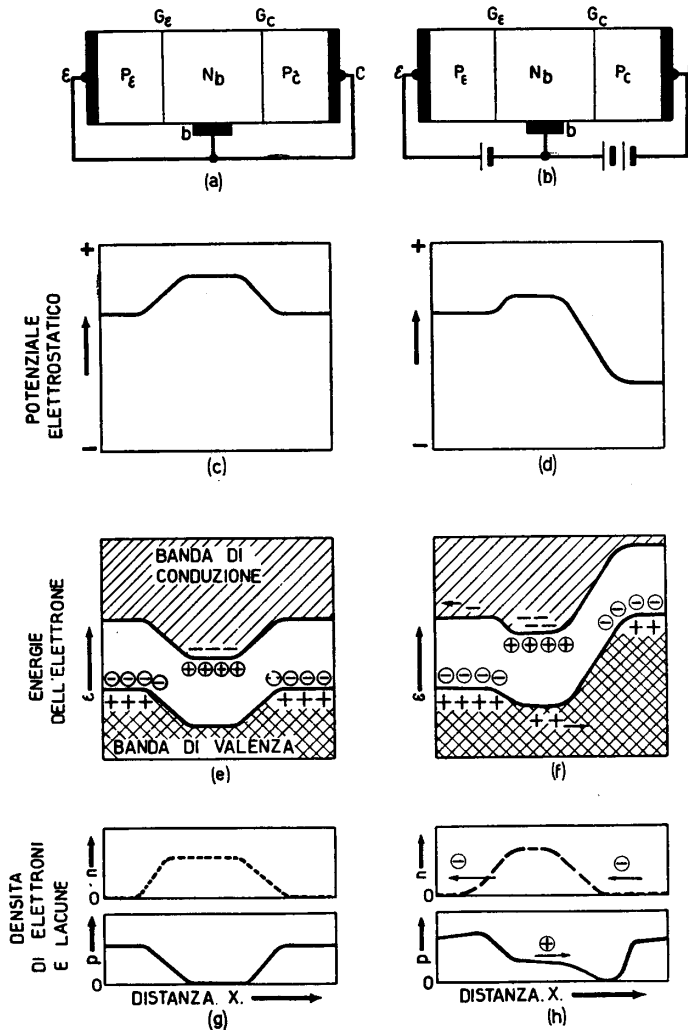



Fig. 6-5 – Transistore a giunzione tipo *p-n-p*. Distribuzione del potenziale elettrostatico, delle energie dell'elettrone e delle densità delle lacune e degli elettroni in funzione della posizione: *a, c, e, g,* senza polarizzazioni applicate; *b, d, f, h,* con polarizzazioni applicate.

gione di tipo *n*, N_b. P_ε prende il nome di emettitore, P_c quello di collettore, ed N_b quello di base.

Nel caso in esame si ha da fare con un transistore *p-n-p*, le tre lettere minuscole stando ad indicare il tipo di conduttività rispettivamente dell'emettitore, della base e del collettore, nell'ordine; esistono anche i transistori *n-p-n* per i quali i simboli hanno lo stesso significato.

La discussione che segue, fatta sul tipo *p-n-p*, vale ovviamente anche per il tipo *n-p-n*, purchè si tenga conto della diversità dei valori della mobilità fra elettroni e lacune, e vengano cambiati i segni delle polarizzazioni applicate. Infatti, come si è già osservato nel paragrafo precedente, l'emettitore è sempre polarizzato in senso diretto rispetto alla base, mentre il collettore è polarizzato in senso inverso. Pertanto, in un transistore *p-n-p*, una delle due batterie di alimentazione va connessa col polo positivo all'emettitore e col polo negativo alla base, e l'altra batteria col polo negativo al collettore e col polo positivo alla base, mentre in un transistore *n-p-n* avviene il contrario, cioè la batteria inserita fra emettitore e base va col polo negativo all'emettitore e col polo positivo alla base, e la batteria inserita fra base e collettore va col polo negativo alla base e col polo positivo al collettore.

Tornando alla fig. 6-5, nella parte *g* è indicata la concentrazione di equilibrio delle lacune e degli elettroni, e nella parte *c* il potenziale elettrostatico. Le lacune, quali particelle elettropositive, tendono ad occupare i punti di potenziale elettrostatico più basso; gli elettroni invece, avendo una carica negativa, occupano i punti di potenziale più alto.

Il diagramma delle bande energetiche è visibile nella parte *e*; come si vede chiaramente dalla figura, si ha la successione di due giunzioni, per le quali valgono tutte le argomentazioni già svolte nel capitolo precedente.

È importante ora osservare la situazione che si viene a creare quando vengono applicate le polarizzazioni. Nella parte *b* della figura 6-5 è applicata una tensione inversa attraverso la giunzione collettore-base, ed una piccola tensione diretta attraverso la giunzione fra base ed emettitore.

Se, come avviene in realtà, le regioni di tipo *p* hanno una conduttività molto maggiore della regione di tipo *n*, la maggior parte della corrente attraverso le giunzioni sarà dovuta alle lacune. Inoltre, se la regione di tipo *n*, N_b, ha uno spessore abbastanza limitato, in modo che una lacuna possa diffondersi attraverso ad esso senza ricombinarsi con un elettrone, la corrente di lacune attraverso la giunzione emettitore-base, scorrerà anche attraverso la giunzione base-collettore.

Se si suppone che le correnti dovute agli elettroni attraverso le due giunzioni siano trascurabili, e se non si tiene conto della ricombinazione nella zona di base N_b, il transistore in esame non avrà corrente di base.

Il controllo della corrente del collettore è definito dalla quantità

$$\alpha = \left| \frac{\partial I_c}{\partial I_\varepsilon} \right|_{V_c = \text{cost.}} \tag{6-31}$$

che, con le supposizioni ora fatte, avrà valore unitario, cioè le variazioni della corrente del collettore saranno uguali alle variazioni della corrente dell'emettitore.

In realtà ciò non avviene, perchè le ipotesi fatte non sono esattamente verificate, però ci si avvicina molto alle condizioni ideali.

L'azione del transistore è basata sul controllo della corrente in una giunzione polarizzata in senso inverso (il collettore), mediante iniezione di portatori nella regione di barriera da parte di un'altra giunzione, prossima alla prima (l'emettitore).

Prendiamo ora in esame l'iniezione di lacune da un emettitore di tipo *p* nella regione di base di tipo *n* di un transistore *p-n-p*.

Abbiamo già visto che il materiale di tipo *p* che costituisce l'emettitore, ha una densità di portatori di carica molto maggiore, e quindi una resistività molto minore, di quella del materiale di tipo *n*, costituente la base, e che pertanto la massima parte della corrente sarà dovuta alle lacune iniettate. Siccome il campo elettrico è trascurabile nella regione di base, i portatori si muovono solamente per diffusione.

Se le lacune e gli elettroni si muovessero con uguale velocità, il rapporto fra la corrente dovuta agli elettroni, γ_n e quella dovuta alle lacune, γ_p sarebbe uguale al rapporto $\frac{\sigma_B}{\sigma_E}$ fra la conduttività della regione di base (σ_B) e la conduttività della regione di emettitore (σ_E); siccome però le velocità di diffusione dipendono dalla lunghezza di diffusione, cioè dalla distanza oltre la quale la concentrazione dei portatori di carica diminuisce di un fattore pari a $\frac{1}{e}$, nella regione in cui entrano i portatori, risulta che il rapporto effettivo fra la corrente di elettroni e la corrente di lacune viene ad essere

$$\frac{\gamma_n}{\gamma_p} = \frac{\sigma_B}{\sigma_E} \cdot \frac{L_{pB}}{L_{nE}} \tag{6-32}$$

in cui L_{pB} = lunghezza di diffusione delle lacune nella base;
L_{nE} = lunghezza di diffusione degli elettroni nell'emettitore.

La parte della corrente totale, dovuta alle sole lacune, γ_p, è data da

$$\gamma_p = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_B}{\sigma_E} \cdot \frac{L_{pB}}{L_{nE}}} \simeq 1 - \frac{\sigma_B}{\sigma_E} \cdot \frac{L_{pB}}{L_{nE}} \qquad (6\text{-}33)$$

Infatti, basta tener presente che $\gamma_n + \gamma_p = 1$ e sostituire $1 - \gamma_p$ al posto di γ_n nell'equazione (6-3 2).

Per ottenere un buon emettitore è necessario che γ si approssimi il più possibile all'unità; ciò si ottiene generalmente impiegando, per la regione dell'emettitore, germanio con una resistività molto bassa.

Lo spessore della base, W_B, è di solito molto minore della lunghezza di diffusione L_{pB} delle lacune nella base.

Il gradiente della concentrazione alla giunzione dell'emettitore è ampiamente determinato fissando, come condizioni ai limiti, che la densità dei portatori di corrente iniettati sia zero in corrispondenza alla giunzione del collettore, che si trova ad una distanza W_B dall'emettitore, pari allo spessore della regione di base.

Praticamente tutto si riduce a fissare una distanza fissa (W_B) al posto di una distanza media, $L_{pB} > W_B$.

Per un transistore che soddisfi a queste condizioni, l'equazione (6-3 3) diviene:

$$\gamma_p = 1 - \frac{\sigma_B}{\sigma_E} \cdot \frac{W_B}{L_{nE}} \qquad (6\text{-}34)$$

Analogamente, per gli elettroni iniettati nella regione di base di un transistore *n-p-n*, si ha:

$$\gamma_n = 1 - \frac{\sigma_B}{\sigma_E} \cdot \frac{W_B}{L_{pE}} \qquad (6\text{-}35)$$

Se lo spessore W_E della regione dell'emettitore è minore di L_{nE} o di L_{pE}, nelle formule (6-34) e (6-35) basta sostituire W_E al posto di L_{nE} o di L_{pE}.

A differenza di quanto avviene nel funzionamento di un tubo a vuoto, in cui attorno al catodo si forma una regione di carica spaziale, nella regione di base di un transistore, i portatori minoritari iniettati vengono neutralizzati dai portatori maggioritari presenti nel medesimo volume.

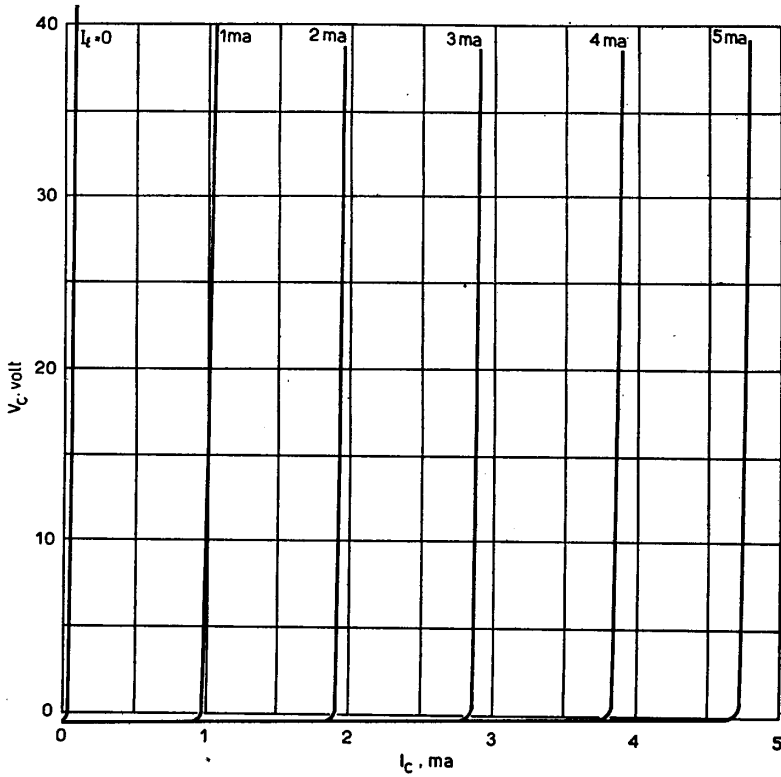



Fig. 6-6 – Caratteristiche fra tensione (V_c) e corrente (I_c) del collettore per un transistore a giunzione.

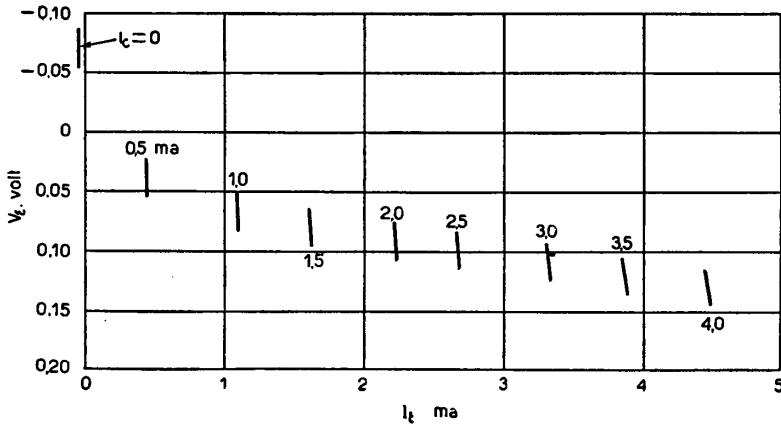



Fig. 6-7 – Caratteristiche fra tensione (V_ε) e corrente (I_ε) dell'emettitore per un transistore a giunzione.

Inoltre, mentre nel tubo a vuoto c'è una tensione acceleratrice fra catodo e anodo, in un transistore i portatori minoritari iniettati si muovono per diffusione in tutte le direzioni possibili, perchè nella regione di base non vi è alcun campo elettrico sensibile.

Pertanto essi non vengono realmente attratti verso il collettore, il quale però raccoglie tutti i portatori che lo raggiungono.

Si è già visto che in prossimità di una giunzione *p-n* polarizzata in senso inverso si ha un campo elettrico molto intenso.

È a causa di tale campo che i portatori minoritari iniettati nella regione di base, quando arrivano alla giunzione del collettore, vengono fortemente attratti ed introdotti nella regione del collettore.

Siccome gli elettroni e le lacune continuamente si ricombinano fra di loro, è necessario far raggiungere la regione barriera della giunzione del collettore, polarizzata in senso inverso, alla maggior parte possibile dei portatori iniettati, prima che avvenga una ricombinazione. Ciò richiede una distanza piccolissima fra emettitore e collettore, comunque minore della lunghezza di diffusione.

I portatori che si ricombinano nella regione di base originano una corrente nel circuito di base.

Nel germanio, la lunghezza di diffusione L, può variare da pochi centesimi di millimetro fino a qualche millimetro.

Si hanno in corrispondenza valori del « tempo di vita » da meno di 1 microsecondo fino ad alcuni millesimi di secondo.

Le famiglie di curve caratteristiche per un tipo generico di transistore a giunzione sono riportate nelle figure 6-6 e 6-7.

6-4. Transistori ad effetto di campo.

È questo un tipo di transistore che è ancora in fase di studio presso i laboratori della Bell Telephone, e le cui applicazioni sono attualmente sperimentali.

Il principio del suo funzionamento è totalmente diverso da quello del classico transistore a giunzione, ma i risultati che si ottengono con esso sono del tutto analoghi, con in più la prerogativa di poter funzionare a frequenze alquanto più elevate di quelle raggiungibili con i transistori normali.

Come introduzione allo studio del funzionamento del transistore ad effetto di campo, riprendiamo per un momento in esame il comportamento di una giunzione *p-n* polarizzata in senso inverso. Come si è già osservato nel capitolo V, sotto l'azione del campo elettrico applicato, i portatori di carica di entrambi i segni vengono allontanati dalla

giunzione, per cui si viene a formare una zona priva sia di elettroni in eccesso che di lacune, ed il semiconduttore in tale zona presenta la configurazione di un isolante perfetto. La giunzione agisce come uno sbarramento per la corrente, e ne inibisce quindi il passaggio (tranne che per la corrente di saturazione). Questa zona isolante, priva di portatori di corrente, prende il nome di *regione di carica spaziale.* Essa confina però con due regioni conduttrici, di conduttività rispettivamente di tipo *p* e di tipo *n*.

È quindi lecito paragonare una giunzione *p-n*, polarizzata in senso inverso, ad un condensatore, con la distanza fra le armature pari all'ampiezza totale della regione di carica spaziale (fig. 6-8).

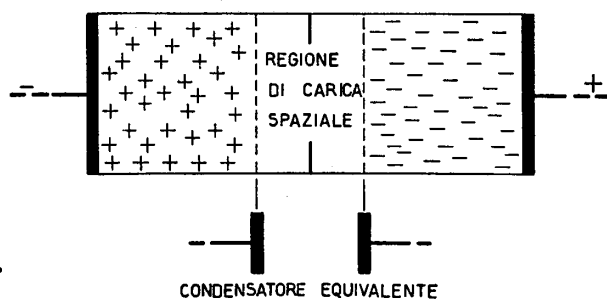



Fig. 6-8 – Giunzione *p-n* polarizzata in senso inverso, paragonata ad un condensatore.

Se la tensione applicata agli estremi della giunzione aumenta, i portatori di carica vengono maggiormente allontanati dalla giunzione, aumentando l'ampiezza della regione di carica spaziale e, di conseguenza, aumentando la distanza fra le armature del condensatore equivalente.

Pertanto, all'aumentare della tensione inversa applicata ad una giunzione *p-n*, la capacità della giunzione diminuisce.

Ciò premesso, esaminiamo la costituzione ed il funzionamento di un transistore ad effetto di campo (vedi fig. 6-9).

Il complesso è costituito da una piastrina di semiconduttore di tipo *n*, munita di due giunzioni affacciate e connesse fra loro.

Se ora (fig. 6-9 *a*) le due regioni *p* vengono cortocircuitate col terminale sinistro della regione *n* e questo posto a massa, mentre un potenziale positivo viene applicato al terminale destro, si avrà un passaggio di corrente nella direzione indicata in figura, dovuta ad uno spostamento di elettroni nel senso opposto a quello indicato dalla freccia.

Il contatto a sinistra è l'origine, la « sorgente » di questi elettroni, ed il contatto di destra li « raccoglie » dal materiale.

I due contatti vengono perciò denominati rispettivamente « sorgente » e « raccoglitore », e con queste diciture sono indicati in figura.

Siccome il materiale usato è germanio di tipo *n*, il quale presenta una certa resistenza, il flusso di corrente produrrà una caduta di tensione nel materiale, rendendolo più positivo dalla parte del raccoglitore. Ora, dato che le due regioni di tipo *p* sono connesse alla sorgente, lo stesso potenziale di quest'ultima si presenta ovviamente alle due giunzioni, le quali risultano pertanto polarizzate in senso inverso.

Si è visto in precedenza che una giunzione polarizzata in senso inverso genera una regione di carica spaziale; nel transistore in esame le due giunzioni polarizzate in senso inverso sono una di fronte all'altra, e quindi le due regioni di carica spaziale si propagano nel germanio una verso l'altra, diminuendo così la regione che partecipa alla conduzione. Questa regione centrale della piastrina viene denominata il « canale ».

Risulta evidente che, essendo diminuita la sezione del canale, la resistenza fra la sorgente ed il raccoglitore diventa maggiore di quanto non lo fosse prima che venisse applicata la tensione.

Se il potenziale del raccoglitore viene aumentato, le regioni di carica spaziale si estendono ulteriormente, e la resistenza fra la sorgente ed il raccoglitore aumenta ancora.

Nelle figure 6-5 *a* e *b* sono illustrati i due casi in esame ed è pure riportata la curva della corrente in funzione della tensione applicata al raccoglitore.

Va notato che la forma assunta dalla regione di carica spaziale è dovuta al gradiente di potenziale che si verifica fra sorgente e raccoglitore.

Supponiamo ora di aumentare ancora la tensione applicata al raccoglitore, fino a far sì che le due regioni di carica spaziale si incontrino (fig. 6-9 *c*). Questa condizione viene denominata « condizione di chiusura », e corrisponde al valore massimo della corrente.

Se la tensione del raccoglitore viene aumentata ulteriormente, la corrente rimane costante. Ciò può venir intuitivamente dimostrato nel modo seguente:

1) La corrente non può aumentare. Infatti, se la corrente aumentasse, aumenterebbe pure la caduta di tensione dovuta alla resistenza del canale; il potenziale negativo che in tal modo si presenterebbe alla sorgente, verrebbe trasferito alle due giunzioni, e quindi le regioni di carica spaziale si incontrerebbero lungo un tratto finito del

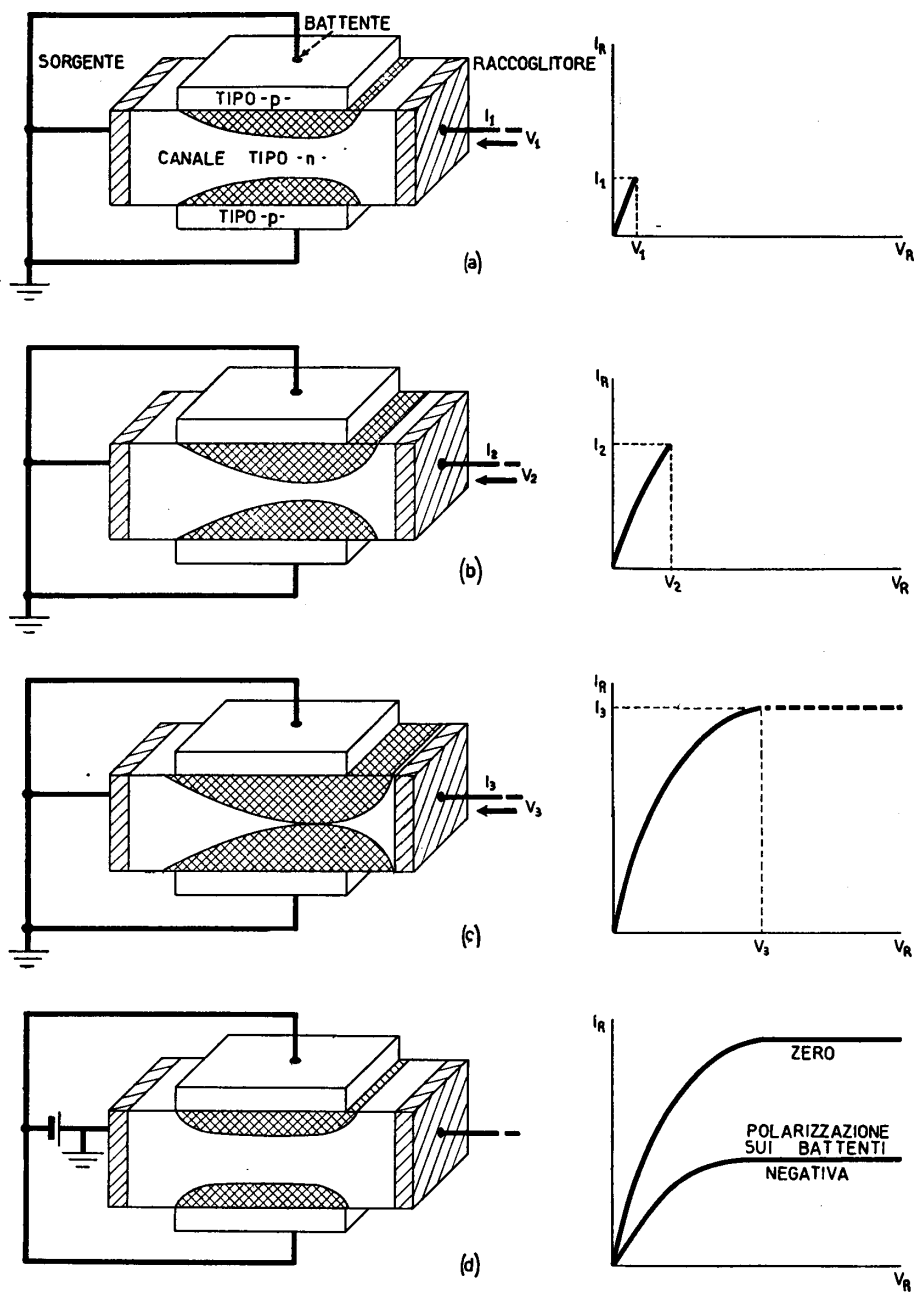



Fig. 6-9 – Rappresentazione schematica di un transitore ad effetto di campo in cui si possono osservare le variazioni della forma della regione di carica spaziale per i casi di: *a*) tensione di battente nulla e piccola tensione al raccoglitore; *b*) tensione al raccoglitore più elevata; *c*) condizione di chiusura per tensione nulla ai battenti; *d*) tensione applicata sia ai battenti che al raccoglitore.

canale, generando così una resistenza altissima fra sorgente e raccoglitore, resistenza tale da bloccare immediatamente la circolazione di corrente.

2) La corrente non può diminuire. Infatti, se ciò accadesse, diminuirebbe pure la caduta di potenziale nel canale, facendo sì che le regioni di carica spaziale si contraggano. Questa contrazione, dando luogo ad un aumento della sezione del canale, farebbe diminuire la rèsistenza fra sorgente e raccoglitore, e quindi la corrente dovrebbe aumentare, anzichè diminuire.

La conclusione si trae immediatamente.

Le due regioni di tipo *p* causano l'espansione e la contrazione delle regioni di carica spaziale, e, di conseguenza, determinano la sezione del canale. A queste due regioni si dà il nome di « battenti ».

Nel caso ora considerato, i battenti erano cortocircuitati con la sorgente.

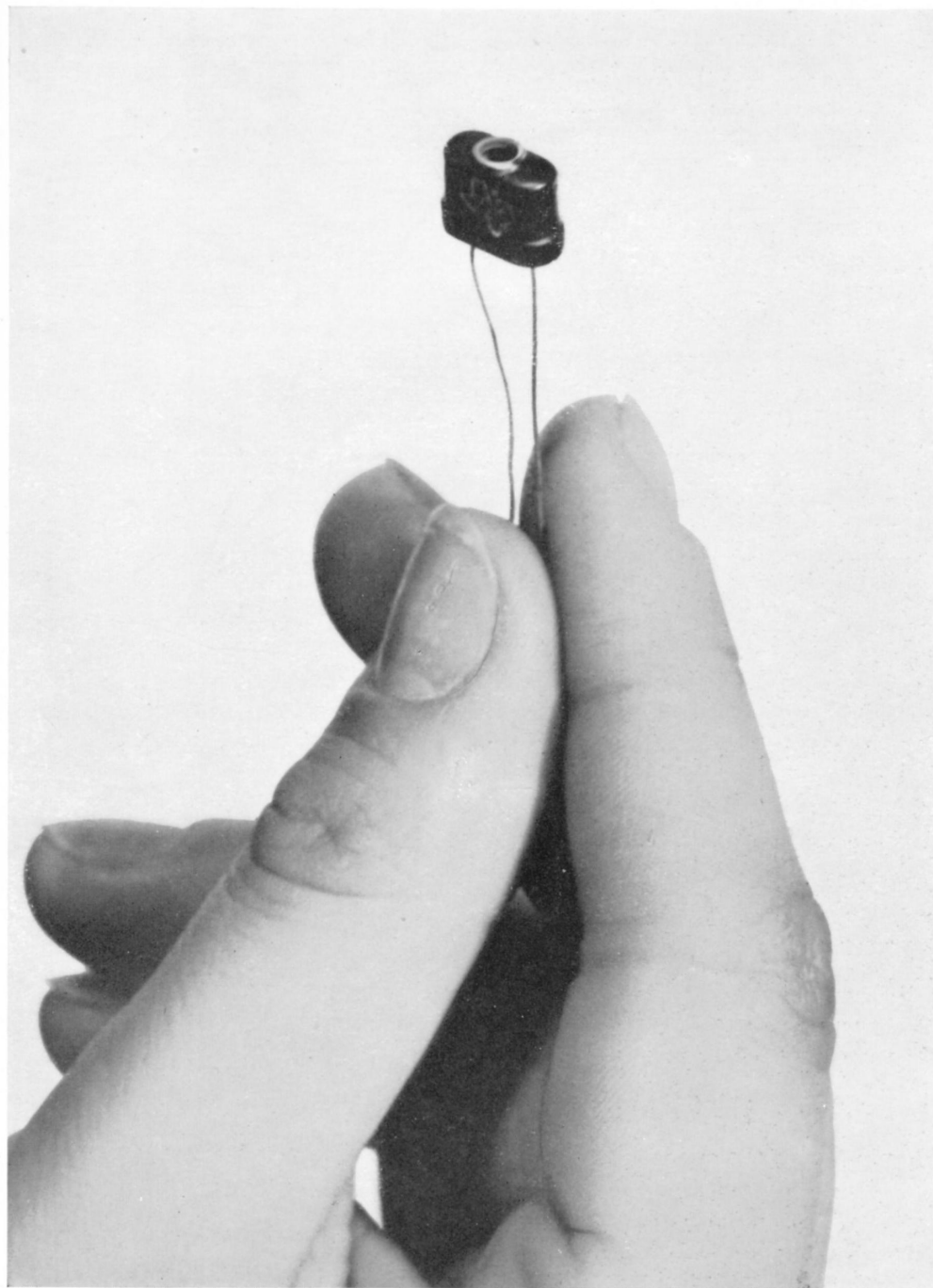
In figura 6-9 *d* è illustrato un caso diverso, in cui, fra i due battenti e la sorgente, è applicata una tensione tale da polarizzare le giunzioni in senso inverso. In queste condizioni si verifica un'espansione delle regioni di carica spaziale, senza che al raccoglitore venga applicata una polarizzazione. La resistenza iniziale fra sorgente e raccoglitore è quindi più elevata, e, quando viene applicata la polarizzazione al raccoglitore, la corrente è sempre minore che nel caso precedente. Inoltre, per raggiungere la condizione di chiusura è sufficiente fornire al raccoglitore una tensione minore di prima. Nel diagramma della stessa figura sono tracciate le curve caratteristiche $I_R = f(V_R)$ per entrambi i casi, cioè con e senza polarizzazione ai battenti.

In figura 6-10 è tracciata una famiglia di curve caratteristiche con la tensione ai battenti come parametro.

Si osserva subito che, man mano che la tensione ai battenti diventa più negativa, la chiusura si ottiene a tensioni più basse, ed il valore della corrente nel punto di chiusura è anch'esso minore.

In figura 6-11 è schematizzato un transistore ad effetto di campo disposto in un circuito che gli consente di funzionare come amplificatore.

Se la tensione dei battenti viene regolata in modo tale da far lavorare il transistore sempre nelle condizioni di chiusura, si vede dalle curve di figura 6-10 che una variazione di V_B da 0 a — 5 volt produce una variazione nella corrente del raccoglitore di 5 mA, cioè di 1 mA per volt.

Così se V_B subisse una variazione di 1 volt, ottenuto, per esempio, applicando un segnale in corrente alternata, la corrente del raccogli-

Fototransistore al germanio a due terminali. La funzione dell'emettitore viene svolta dalla luce che cade sulla giunzione attraverso la finestrella circolare praticata sulla sommità del cappuccio (vedi pag. 67).

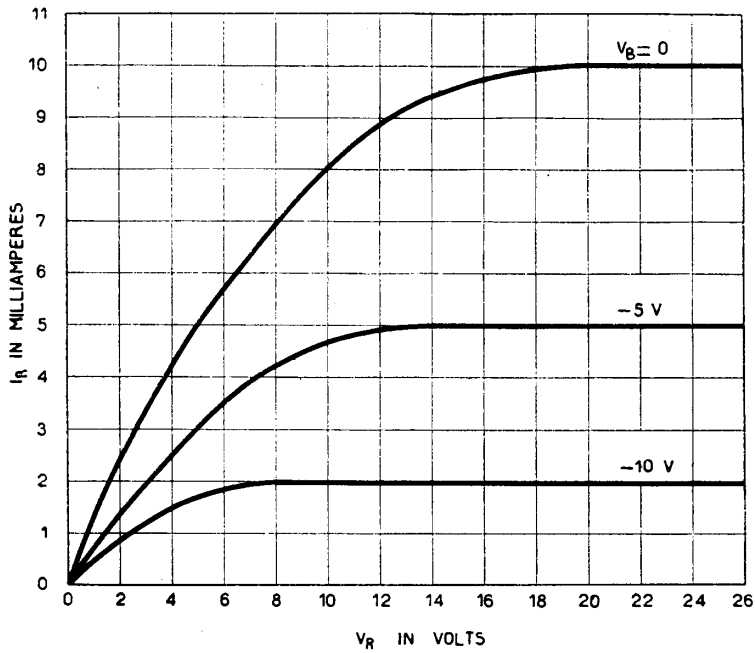



Fig. 6-10 – Famiglia di curve caratteristiche per un transistore ad effetto di campo, con la tensione ai battenti come parametro.

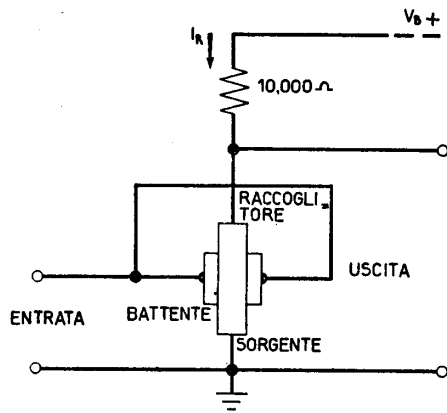



Fig. 6-11 – Schema di massima di un amplificatore che fa uso di un transistore ad effetto di campo.

tore I_R subirebbe una variazione di 1 mA e la variazione della caduta di potenziale attraverso la resistenza di carico di 10 000 Ω sarebbe di 10 volt. Il guadagno di tensione sarebbe pertanto di 10 volte.

Supponendo che l'impedenza fra battenti e sorgente sia di 1 MΩ, valore normalissimo per una giunzione *p-n* polarizzata in senso inverso, la variazione della potenza di ingresso sarà $\frac{V^2}{R_B} = 10^{-6}$ W, mentre la variazione della potenza d'uscita sarà $RI^2 = 10^4 \times (10^{-3})^2 = 10^{-2}$ W. Si avrà pertanto un guadagno di potenza pari a 40 dB.

Rispetto al transistore a giunzione questo tipo presenta, come si è visto, moltissime diversità. Essenziali sono le seguenti: in primo luogo, nel tipo ad effetto di campo i portatori di corrente si muovono sotto l'influenza di un campo elettrico, mentre nel transistore a giunzione essi si spostano per diffusione. Siccome la velocità di spostamento sotto l'azione di un campo applicato è molto maggiore di quella di diffusione, il tempo di transito dei portatori di carica, a parità di dimensioni, sarà molto più breve nel tipo ad effetto di campo. Perciò, dato che la frequenza di lavoro massima è limitata dal tempo di transito, il transistore ad effetto di campo è potenzialmente in grado di lavorare a frequenze più elevate.

In secondo luogo l'impedenza d'entrata del tipo ad effetto di campo è elevata, mentre quella del tipo a giunzione è bassa, quindi nei circuiti applicativi tale diversità può essere determinante per la scelta di uno dei due tipi.

In terzo luogo il transistore a giunzione riesce a lavorare con alta efficienza a livelli di potenza molto più bassi di quelli ammissibili per il tipo ad effetto di campo.

CAPITOLO VII

CENNI SU ALTRI COMPLESSI

7-1. Fototransistori.

Il fototransistore è un dispositivo sensibile all'intensità ed alla frequenza delle radiazioni luminose che lo colpiscono. Fisicamente è costituito da un diodo a giunzione, anche se viene considerato come un transistore, in quanto la funzione dell'emettitore viene svolta dalla luce.

Il principio del suo funzionamento è molto semplice. Le radiazioni luminose che colpiscono il semiconduttore, forniscono agli elettroni nella banda di valenza un'energia sufficiente a trasferirli nella banda di conduzione. La rottura dei legami di valenza porta ad un aumento delle lacune e degli elettroni disponibili, i quali, essendo portatori di corrente, diminuiscono la resistività del materiale.

Siccome la giunzione è polarizzata in senso inverso, in condizioni di riposo si ha solamente il passaggio della corrente di saturazione. Quando la giunzione viene illuminata, la corrente inversa aumenta, e tale aumento è una funzione dell'intensità luminosa della luce incidente, e della sua lunghezza d'onda.

La sensibilità del dispositivo aumenta nella regione corrispondente alle radiazioni infrarosse, le quali possono penetrare più profondamente, facendo uso di un'area sensibile maggiore.

Il germanio è infatti praticamente trasparente alle radiazioni la cui lunghezza d'onda è maggiore di 15 000 Å.

In figura 7-1 è tracciata la curva di risposta in funzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente, per un'intensità luminosa costante.

La famiglia di curve caratteristiche, con l'intensità luminosa come parametro, è tracciata in figura 7-2.

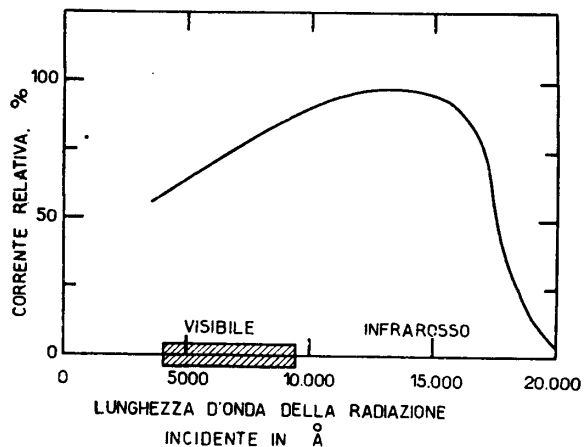



Fig. 7-1 – Risposta in frequenza di una cella fotoelettrica al germanio.

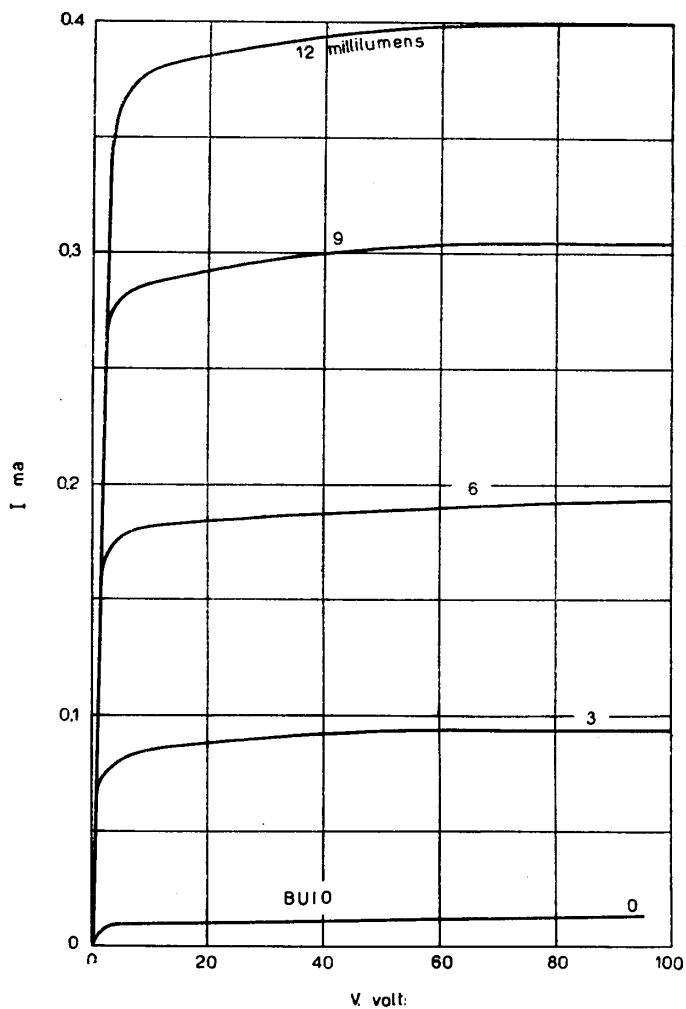



Fig. 7-2 – Caratteristiche fra tensione e corrente, con l'intensità luminosa come parametro, per una cella fotoelettrica al germanio.

7-2. Tetrodo transistore.

Il tetrodo rappresenta una modificazione del transistore a giunzione per accrescimento, *n-p-n*. Esso è formato da una barretta di germanio in cui sono presenti due giunzioni. Le estremità della barretta, cioè l'emettitore ed il collettore, sono costituite da germanio di tipo *n*, mentre la parte centrale, la base, è formata da germanio di tipo *p*. La

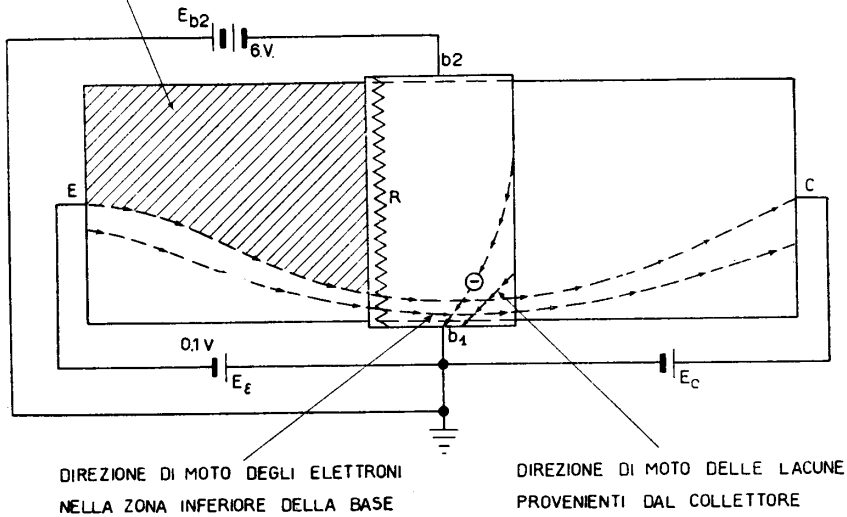



Fig. 7-3 – Schematizzazione del principio di funzionamento di un tetrodo transistore. *R* rappresenta una resistenza che causa la caduta di tensione (supposta uniforme) nell'interno della regione di base. La connessione di base normale è b_1.

regione di base è munita di un secondo contatto ohmico, sulla faccia opposta a quella usata per il normale reoforo di base.

Con riferimento alla figura 7-3, indichiamo con b_1 il terminale normale di base, e con b_2 il secondo terminale di base.

Applicando fra questi due terminali una tensione tale da rendere b_2 negativo rispetto a b_1, ed inoltre di un valore molto superiore a quello della tensione applicata fra base ed emettitore, si viene a formare un gradiente di potenziale nell'interno della regione di tipo *p*. Tale regione può quindi venir considerata come una resistenza, e pertanto lungo questa resistenza esiste una caduta di tensione uniforme.

In un transistore *n-p-n* normale, quando l'emettitore viene polarizzato, la tensione ad esso applicata è molto bassa (si tratta sempre di una giunzione polarizzata in senso diretto), ma è però sufficiente a far penetrare gli elettroni nella regione di base, attraverso *tutta* la superficie della giunzione.

Nel caso del tetrodo invece ciò non avviene.

Infatti, riferendoci sempre alla figura, supponiamo, per fissare le idee, che la tensione fra emettitore e base sia di 0,1 volt mentre la tensione fra i 2 terminali di base sia di 6 volt; abbiamo visto come esista un gradiente di potenziale nella regione di base, e come questo gradiente si possa considerare uniforme. Ciò significa che, nel caso in esame, procedendo dall'alto verso il basso, nell'interno della base, è presente una tensione negativa che varia linearmente da — 6 volt (in sommità) fino a 0 volt (al fondo).

Gli elettroni, sotto l'influenza della tensione applicata all'emettitore, arrivano alla giunzione fra emettitore e base con un potenziale di circa — 0,1 volt e di conseguenza possono superare la giunzione solo quegli elettroni il cui potenziale è negativo rispetto al livello di potenziale dovuto al gradiente determinato dalla resistenza dello strato di base.

Tutti gli altri elettroni, che si presentano alla giunzione in punti per i quali il valore del potenziale dovuto al gradiente è superiore ai — 0,1 volt, trovano invece il passaggio inibito.

L'effetto risultante è di ridurre la superficie utile della giunzione e di costringere la corrente nella regione di base a passare solamente per la ristretta zona prossima a b_1. Da ciò deriva una migliore risposta in frequenza ed una più bassa capacità del collettore.

Sull'argomento si torna nella seconda parte, in cui sono esposti gli scarsissimi dati che si hanno sulla macchina automatica per il montaggio dei tetrodi.

7-3. Batteria solare.

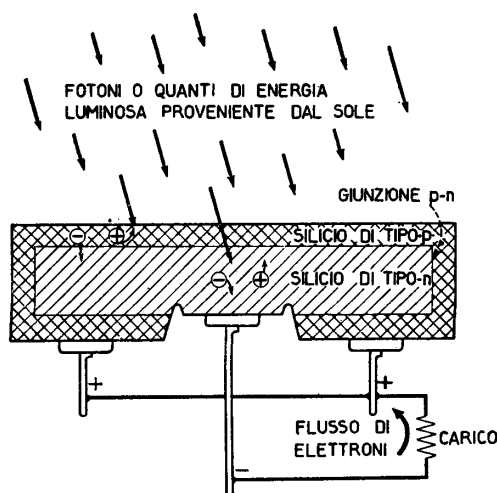
È un ritrovato dei laboratori della Bell Telephone, annunciato nell'aprile del 1954, e consiste in una serie di celle al silicio che sfruttano la fotosensibilità delle giunzioni *p-n*.

Infatti il cuore di una cella solare è una giunzione *p-n*, ottenuta da una piastrina di silicio tipo *n* sulla cui superficie vengono « diffusi » atomi di un elemento trivalente, i quali ne trasformano il tipo di conduttività. Tralasciando la descrizione dei procedimenti che conducono alla formazione della giunzione, esaminiamo il complesso finito, quale

si presenta, in forma schematica, nella figura 7-4 ed analizziamone il funzionamento.

Come si è già visto al cap. V, una giunzione *p-n* presenta sempre un campo elettrico interno proprio, il quale fa sì che le lacune rimangano nella zona di tipo *p* e gli elettroni nella zona di tipo *n*.

Se ora si immagina che dei fotoni vadano a colpire un semiconduttore, si sa che essi cedono al materiale la loro energia, e spezzano dei legami di valenza, creando in tal modo delle coppie lacuna-elettrone.

Fig. 7-4 – Sezione trasversale di una piastrina di silicio diffusa superficialmente in modo da formare una cella solare. I fotoni, o quanti di energia luminosa, provenienti dal sole, creano coppie lacuna-elettrone, che vengono utilizzati nel circuito esterno.

Generalmente questi portatori di carica si ricombinano fra di loro in un tempo molto breve, e, non appena viene a cessare l'effetto della radiazione luminosa, cessano anche di esistere questi portatori nell'interno del semiconduttore.

Se però la creazione delle coppie lacuna-elettrone ha luogo in prossimità di una giunzione, l'effetto del campo elettrico interno, proprio della giunzione stessa, si fa sentire, e pertanto le lacune e gli elettroni, che si formano in seguito alla rottura dei legami di valenza, non possono più ricombinarsi fra loro, perchè, essendo di segno opposto, vengono separati dal campo, e precisamente, le lacune vengono inviate nella regione di tipo *p* e gli elettroni nella regione di tipo *n*.

Per mezzo di opportuni collegamenti, la corrente che ne risulta può venire utilizzata in un circuito esterno, come si vede in figura.

PARTE SECONDA

TECNOLOGIA

CAPITOLO VIII

ESTRAZIONE E LAVORAZIONE DEL GERMANIO

8-1. Giacimenti.

Il germanio, fino a pochi anni fa, era considerato un elemento raro, non tanto per la sua scarsezza in natura, ma piuttosto perchè non trovava utilizzazione pratica.

Da quando però, intorno al 1940, si cominciarono ad intravvedere le grandi applicazioni consentite dall'impiego dei semiconduttori, il germanio uscì dall'oscurità ed assunse un ruolo di grande importanza. Chimici e fisici si occuparono a fondo della sua estrazione e della sua purificazione, e si può dire che oggi il germanio è un elemento altrettanto noto, quanto il ferro, lo zolfo, il radio, ecc.

La crosta terrestre contiene circa 7 grammi di germanio per tonnellata, quantità tutt'altro che trascurabile, se paragonata ad altri elementi, quali ad esempio il nichel (100 g/t), lo zinco (40 g/t), l'arsenico (5 g/t), il mercurio (0,5 g/t).

In natura il germanio allo stato puro non esiste. Si trova solo combinato con altri elementi, ed anche in proporzioni molto ridotte. Sotto forma di solfuri si trova in parecchi minerali, alcuni dei quali però, come ad esempio l'Argirodite, che ne può contenere fino al 7 %, sono talmente rari, da non poter venire considerati come fonti di sfruttamento.

Vengono utilizzati invece ampiamente la Germanite e l'Ultrabasite. La Germanite è un solfuro di germanio e di rame, contenente ferro e tracce di gallio ($7CuS$, FeS, GeS_2).

Si trova in certa abbondanza nel sud-ovest dell'Africa e contiene circa il 6 % di germanio.

L'Ultrabasite è un solfuro di germanio, d'antimonio, di argento e di piombo ($2Sb_2S_3$, $3GeS_2$, $11Ag_2S$, $28PbS$) e contiene fino al 4 % di germanio.

Oltre che dai solfuri menzionati, il germanio si ricava anche da:

1) Blenda (ZnS) che può dare circa l'1% di germanio.

2) Certe qualità di fossili, ottenuti dai carboni solforosi della regione di Durham in Inghilterra, da alcuni carboni della Virginia e del Kentucky in America, e da alcuni carboni della Russia, che possono dare anche loro circa l'1% di germanio.

3) Certe acque minerali, per esempio di Vichy, che contengono piccole quantità di germanio.

4) Ceneri di alghe marine, contenenti anch'esse piccole quantità di germanio.

8-2. Estrazione del biossido di germanio.

In generale il germanio viene ricavato dal minerale di provenienza per via chimica e si ottiene sotto forma di biossido (GeO_2).

A seconda del materiale di partenza, varia naturalmente anche il processo di estrazione.

Inoltre ogni paese sfrutta i propri giacimenti secondo processi diversi. Citiamo alcuni fra i più forti produttori ed i procedimenti industriali da ciascuno usati.

In America il germanio viene estratto quasi esclusivamente come sottoprodotto dell'industria dello zinco. Le operazioni vengono effettuate nel modo seguente.

Il solfuro di zinco viene trasformato in ossido mediante combustione; successivamente il minerale viene calcinato e ridotto con carbone; lo zinco, liberato, si volatilizza, mentre gli altri costituenti rimangono sotto forma di residui. Il germanio è uno di tali residui; dopo un trattamento con acido cloridrico, le soluzioni calde vengono filtrate. I cloruri di gallio e di germanio, solubili, vengono in tal modo separati dagli altri residui insolubili. Dopo ulteriori vari trattamenti di purificazione, il germanio viene separato dal gallio per distillazione del suo cloruro, $GeCl_4$, il quale bolle a 83°,1.

Successivamente, il tetracloruro di germanio viene idrolizzato e quindi essiccato.

Si ottiene così il biossido di germanio, GeO_2.

Tutto il processo di estrazione descritto, è indicato schematicamente in figura 8-1.

In Inghilterra, la fonte principale del germanio è costituita dalle fuliggini provenienti dalla calcinazione di alcune qualità di carbon fossile, che possono dare fino all'1% di GeO_2.

Dopo trattamento con HCl e distillazione, si ottiene il tetracloruro

di germanio, il quale però contiene forti tracce di arsenico sotto forma di tricloruro ($AsCl_3$).

Per separarlo, si ricorre ad una seconda distillazione del tetracloruro di germanio, in corrente di cloro; con ciò si forma pentacloruro

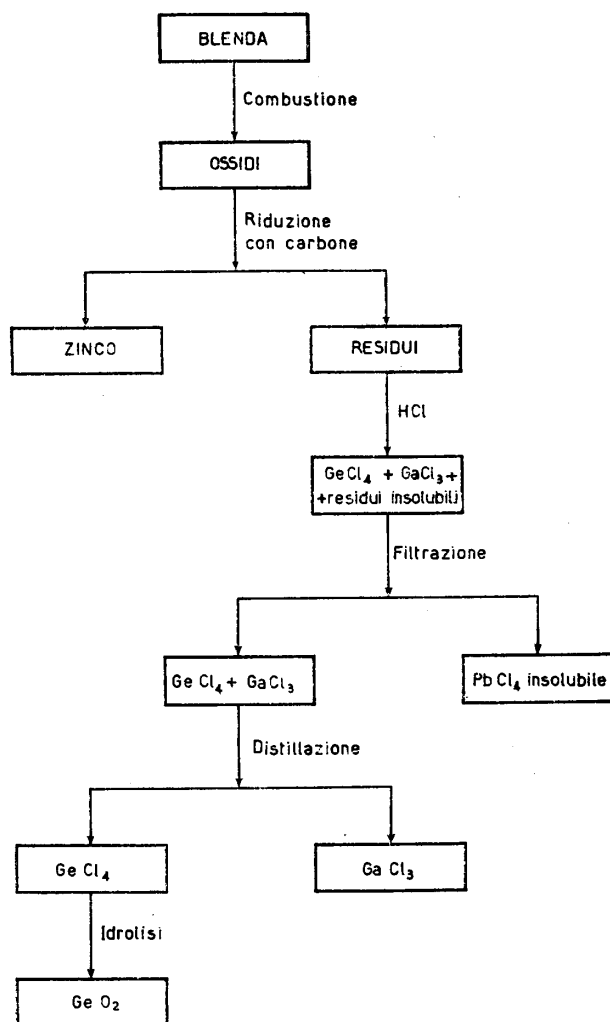



Fig. 8-1 – Schema di estrazione del GeO_2 a partire dalla Blenda. Lavorazione seguita negli Stati Uniti.

di arsenico ($AsCl_5$), molto meno volatile del tetracloruro di germanio, che può così venir raccolto a parte.

Per successiva idrolisi, si ottiene quindi il GeO_2. In figura 8-2 è indicato il relativo schema d'estrazione.

In Germania, Belgio e Francia vengono usati quasi esclusivamente i sottoprodotti metallurgici dell'industria del cadmio e dello zinco.

I metodi di estrazione seguono in generale vari principi. Logicamente ogni fabbricante ha il proprio metodo particolare di lavorazione, che impiega un determinato artificio per eliminare una determinata impurità.

Fig. 8-2 – Schema di estrazione del GeO_2 a partire dalle fuliggini. Lavorazione seguita in Inghilterra.

Per esempio, alcuni eliminano le tracce di arsenico distillando il tetracloruro di germanio su tornitura di rame; altri eliminano il gallio, sfruttando la solubilità del suo cloruro nell'etere. (È anche possibile ottenere piccole quantità di germanio, mediante riduzione diretta con zinco del suo tetracloruro in fase di vapore, e mediante riduzione di alcuni composti organici di germanio).

Ad ogni modo si ottiene sempre, dopo l'estrazione, il germanio sotto forma di biossido. La sua purezza è però ben lontana dai limiti imposti dalle lavorazioni successive, per cui si rende indispensabile una ulteriore purificazione chimica.

8-3. Purificazione per via chimica.

Gli elementi estranei più comunemente presenti nel biossido di germanio, sono l'alluminio, l'arsenico, l'antimonio, lo zinco, il piombo, il silicio, il magnesio, il rame, il boro.

L'analisi chimica e l'analisi spettrografica forniscono ottime indicazioni sugli elementi da eliminare. Generalmente il biossido viene nuovamente trasformato in tetracloruro di germanio, che presenta proprietà molto simili a quelle del tetracloruro di carbonio.

La soluzione viene distillata, quindi ritrattata e ridistillata più volte, fino a che l'analisi spettrografica la rivela sufficientemente pura.

Successivamente il tetracloruro viene versato in acqua ghiacciata perfettamente pura, e si idrolizza immediatamente.

L'idrossido, dopo completa precipitazione, viene filtrato con estrema cura per non contaminarlo; successivamente viene lavato ed essiccato ad una temperatura che si aggira sui 500 °C.

Tutte queste operazioni, semplici di per sè, sono rese molto complicate a causa dell'altissimo livello di purezza che si deve ottenere. Ogni operazione chimica viene effettuata in apparecchi e recipienti di quarzo, i prodotti ed i gas usati devono essere spettrograficamente puri, anche l'acqua usata sia per il lavaggio degli apparecchi che per l'idrolisi, deve essere di una purezza assoluta (l'acqua bidistillata è ancora troppo impura per questi scopi), persino l'atmosfera dei laboratori deve venir rigorosamente controllata per evitare ogni possibilità di contaminazione.

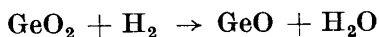
Il biossido di germanio puro così ottenuto, si presenta sotto forma di una polvere biancastra, impalpabile. Le particelle che la costituiscono, infatti, devono avere un diametro dell'ordine di $1 \div 2$ micron.

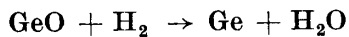
Dimensioni maggiori ostacolerebbero una efficace riduzione del biossido di germanio a germanio metallico nell'operazione successiva.

8-4. Riduzione del biossido di germanio.

Il biossido di germanio reagisce facilmente con l'idrogeno. La riduzione avviene in due fasi successive.

Dapprima si ha la formazione del monossido di germanio, secondo la seguente equazione:

$$GeO_2 + H_2 \rightarrow GeO + H_2O$$

e solo successivamente avviene la riduzione completa a germanio metallico, secondo l'equazione:

$$GeO + H_2 \rightarrow Ge + H_2O$$

Il processo di riduzione si fa avvenire in un forno apposito, in corrente di idrogeno.

Il forno di riduzione, schematizzato in figura 8-3, è formato essenzialmente da un tubo di quarzo, circondato ad un'estremità da un manicotto, in cui circola l'acqua di raffreddamento.

Questa zona, munita di manicotto, costituisce la camera raffreddante del forno, ed in essa, a riduzione avvenuta, viene posta la navicella contenente il germanio, allo scopo di accelerarne il raffreddamento.

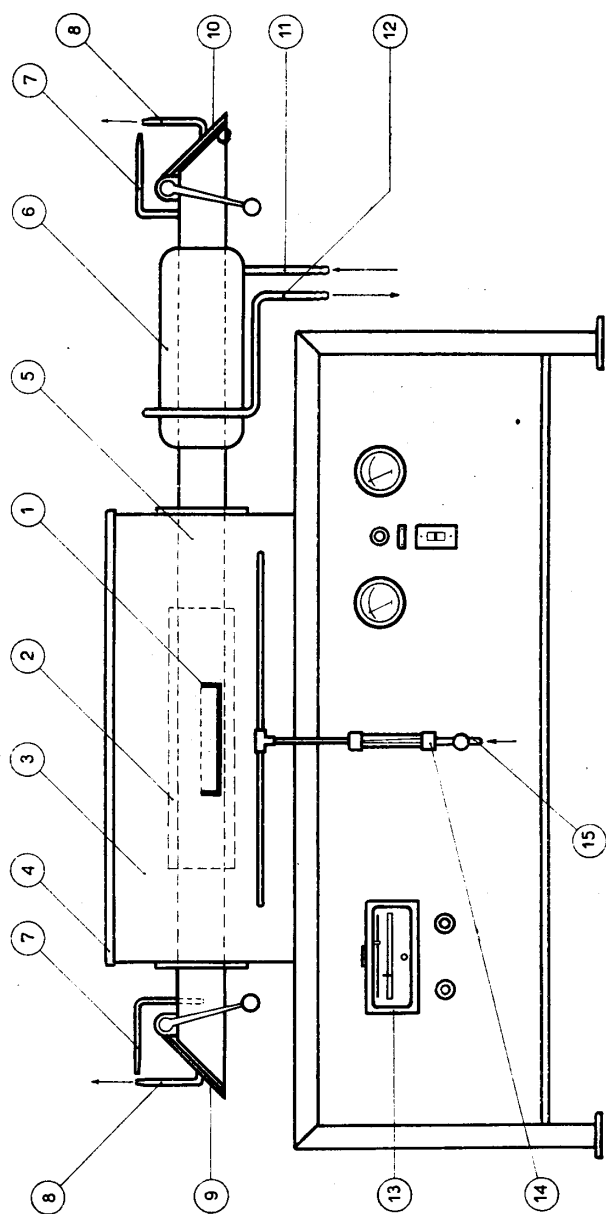
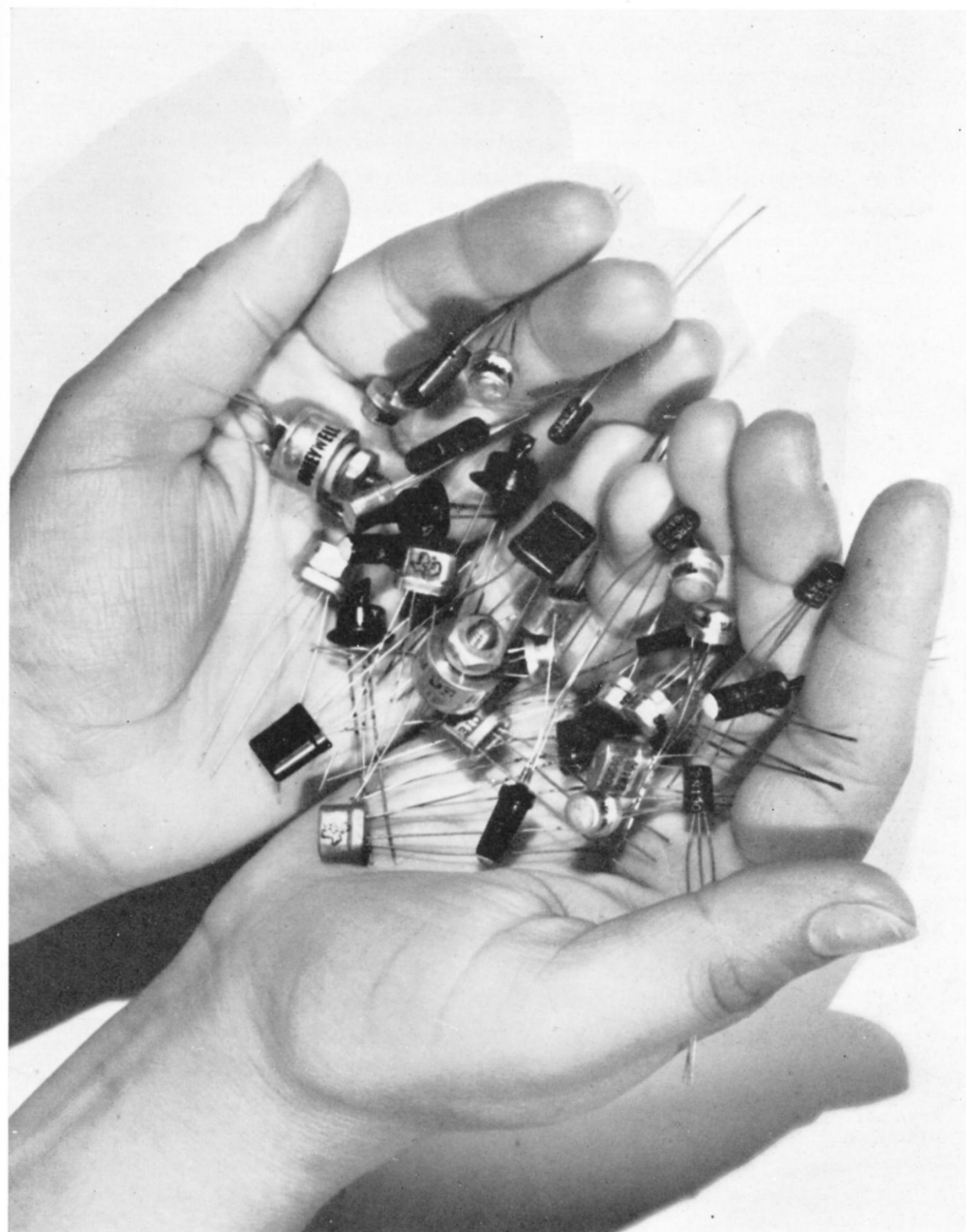



Fig. 8-3 – Schema di un forno per la riduzione del biossido di germanio. Il germanio che si ottiene è policristallino e non ancora sufficientemente puro.

Leggenda: 1, Navicella; *2,* Elemento riscaldante; *3,* Isolante termico; *4,* Coperchio; *5,* Tubo di quarzo; *6,* Manicotto di raffreddamento; *7,* Beccuccio a gas; *8,* Uscita idrogeno; *9,* Guarnizione; *10,* Bocca alimentazione forno; *11,* Entrata acqua raffreddamento; *12,* Uscita acqua raffreddamento; *13,* Indicatore di temperatura; *14,* Flussometro; *15,* Entrata idrogeno.

L'intero equipaggiamento elettronico a transistori di una complessa apparecchiatura, può essere contenuto nel palmo delle mani.

Attorno alla zona centrale del tubo di quarzo è avvolto l'elemento riscaldante, costituito da una piattina di nichel-cromo e alimentato dal secondario di un trasformatore che fornisce la potenza da dissipare per effetto Joule.

Tutta la parte riscaldata del tubo è situata entro un cassone di lamiera, riempito con un isolante termico, come vermiculite od ossido di magnesio. (Il cassone ha il coperchio fissato debolmente, in modo che, in caso di scoppio, la parte che si stacca sia quella superiore, e non una laterale, che potrebbe andare ad investire gli operatori).

Il più vicino possibile all'elemento riscaldante viene posta una termocoppia, che fornisce l'indicazione della temperatura nella zona calda del forno.

All'indicatore di temperatura è accoppiato un termoregolatore a relè, il quale provvede a mantenere la temperatura entro i limiti prefissati.

Il gas viene fatto fluire con continuità durante tutto il processo. Entra dalla parte centrale ed esce alle due estremità, da due tubicini vêrticali. Siccome la quantità di idrogeno che si impiega è notevole, e, uscendo liberamente, saturerebbe ben presto l'ambiente in cui è situato il forno, col pericolo di formare miscela tonante con l'aria, in prossimità delle due uscite dell'idrogeno sono posti due beccucci a gas, la cui fiamma brucia l'idrogeno uscente.

La temperatura del forno è determinata dalla considerazione seguente: come si è visto, la riduzione del GeO_2 a Ge metallico, avviene in due fasi successive, passando per un composto intermedio, il monossido di germanio.

Questo composto intermedio tende a sublimare alla temperatura di 710 °C. Ciò deve venir assolutamente evitato, per cui la temperatura cui generalmente si opera deve essere inferiore a 710 °C. D'altro canto, la riduzione a quella temperatura non è mai completa, non solo, ma il germanio che si ottiene rimane allo stato pulverulento, cosa non adatta alle operazioni successive.

Si possono conciliare le due necessità, compiendo l'operazione in due tempi e precisamente, facendo avvenire una riduzione lenta e prolungata, a temperatura relativamente bassa, nel primo tempo, e completando la reazione violentemente, innalzando la temperatura del forno sino ad ottenere la fusione del materiale, nel secondo tempo. Le fasi della lavorazione si susseguono nel seguente modo.

Il biossido puro viene posto in navicelle di grafite purissima, e le navicelle introdotte nella camera fredda del forno.

L'idrogeno viene fatto fluire per almeno un quarto d'ora a forno

freddo, dopo di che può venir tranquillamente inserito il riscaldamento, non essendoci più alcun pericolo che nel forno siano rimaste tracce d'aria.

Una volta raggiunta la temperatura di regime, che si aggira sui 650 °C, la navicella contenente il biossido, viene spinta nella zona calda del forno, ed il flusso di idrogeno viene opportunamente regolato. Per eseguire questa regolazione bisogna calcolare, in base alla velocità di reazione del processo, la quantità di idrogeno che entra in combinazione con l'ossigeno del GeO_2 nell'unità di tempo, prevedere una maggiorazione per sicurezza, e quindi ricavare la portata.

Il processo dura come minimo due ore. Trascorso questo periodo, gran parte del biossido è già ridotto a germanio metallico, é si può quindi passare alla seconda fase del processo.

La temperatura va portata al di sopra dei 1000 °C per una decina di minuti, tempo sufficiente a completare la riduzione ed a fondere il germanio metallico formatosi.

Completata l'operazione, la navicella viene posta nuovamente nella camera fredda del forno, dove il germanio solidifica, e si porta lentamente ad una temperatura di poco superiore a quella ambiente. Questo raffreddamento avviene in mezz'ora circa, dopo di che la navicella può venir tolta dal forno, ed il germanio metallico, sotto forma di lingotto, è pronto per passare all'operazione successiva.

Lo stesso processo qui descritto, può avvenire anche in un forno continuo, che offre il vantaggio di diminuire di molto il tempo impiegato per ottenere la riduzione. Se si tiene presente però che con un lingotto di germanio di grandezza media, che pesa all'incirca 500 grammi, si possono ricavare parecchie migliaia di piastrine, che vanno a formare altrettanti transistori, si comprende facilmente come il forno di tipo continuo possa rappresentare un vantaggio solo in un'industria con una produzione colossale.

Inoltre anche il forno di tipo continuo ha i suoi lati negativi. Se avviene infatti un inquinamento per un qualsiasi motivo, cosa che può sempre accadere nel corso di una produzione, col forno a cariche singole, si dovranno recuperare soltanto i 500 grammi del lingotto mal riuscito, mentre col forno continuo la quantità di materiale da ritrattare sarà di molto superiore.

8-5. Purificazione per via fisica.

Il germanio che si ottiene al termine del processo di riduzione, presenta una notevole purezza, se si considera la percentuale di elementi estranei in esso contenuti, ma è ancora lontanissimo dal grado

di purezza richiesto per l'impiego cui è destinato. Per via chimica non è però possibile ottenere una purificazione più spinta, appunto perchè le impurità presenti sono in quantità talmente minima, che possono venir denominate « tracce » dal chimico che ne esegue l'analisi, e per alcuni elementi la quantità presente è di un ordine di grandezza tale, da non poter venire rivelata con nessun mezzo chimico.

Si ricorre pertanto ad una purificazione per via fisica, sfruttando una tecnica, largamente usata in passato per la raffinazione dei solidi cristallini, la tecnica delle cristallizzazioni frazionate ripetute. Questo procedimento però, pur dando degli ottimi risultati, richiede una faticosa e ripetuta serie di lavorazioni, e cioè: fondere i cristalli impuri, far solidificare lentamente una parte dei cristalli fusi, togliere i cristalli puri solidificati dal rimanente liquido impuro, ricombinare la parte asportata con altre parti, e ripetere il procedimento più e più volte.

Ad ogni serie di lavorazioni corrisponde un aumento della purezza del materiale cristallino trattato.

Questa tecnica è stata rivoluzionata da un nuovo metodo, conosciuto col nome di « fusione a zone », che ne sfrutta il principio fondamentale, e raggiunge risultati molto migliori con una relativa facilità.

Il metodo di fusione a zone ha inoltre il vantaggio di poter venire impiegato per tutte le sostanze cristalline, che possono venir fuse senza alterarsi, e per le quali esiste una sensibile differenza nella concentrazione di impurità fra le fasi liquida e solida.

Esso consiste nel far passare lentamente una serie di zone fuse lungo un lingotto di solido impuro di una certa lunghezza.

Questa operazione viene eseguita nel forno a induzione schematizzato in figura 8-4. Si tratta di un forno costruttivamente semplice, composto di un tubo di quarzo trasparente, intorno al quale sono disposte 6 o più bobine, raffreddate mediante circolazione d'acqua e percorse da corrente a radiofrequenza, fornita da apposito generatore. Il tubo di quarzo è leggermente inclinato, in modo che l'uscita del gas si trova ad un livello più basso dell'entrata. Questa inclinazione viene fatta allo scopo di creare un tampone di gas inerte entro il tubo, che inibisce l'entrata dell'aria.

Il lingotto di germanio, contenuto in una navicella di grafite purissima, viene introdotto nella parte alta del tubo.

La navicella è collegata ad un tirante, che fa capo ad un tamburo, il quale, azionato da un motore, ruota lentamente e fa avvolgere il tirante, che si trascina dietro la navicella.

Quando la navicella è sistemata, e l'azoto fluisce dall'alto verso il basso, viene inserito il generatore di radiofrequenza e viene fatto par-

tire il motore che provoca l'avanzamento della navicella. Non appena il lingotto di germanio da purificare viene a trovarsi sotto la prima bobina (essendo conduttore, in quanto impuro), viene percorso, per induzione, da una corrente a radio frequenza, e la potenza in esso trasferita deve essere tale da riscaldarlo fino alla fusione. La navicella, avanzando con continuità, fa passare lentamente il lingotto sotto tutte le bobine. Quando l'estremità anteriore del lingotto esce dalla zona d'azione

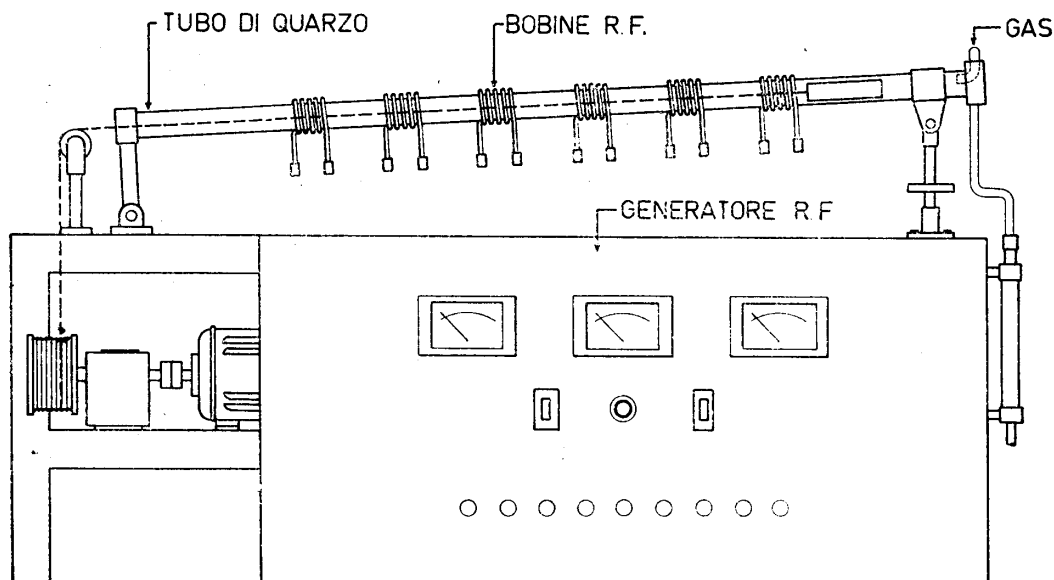
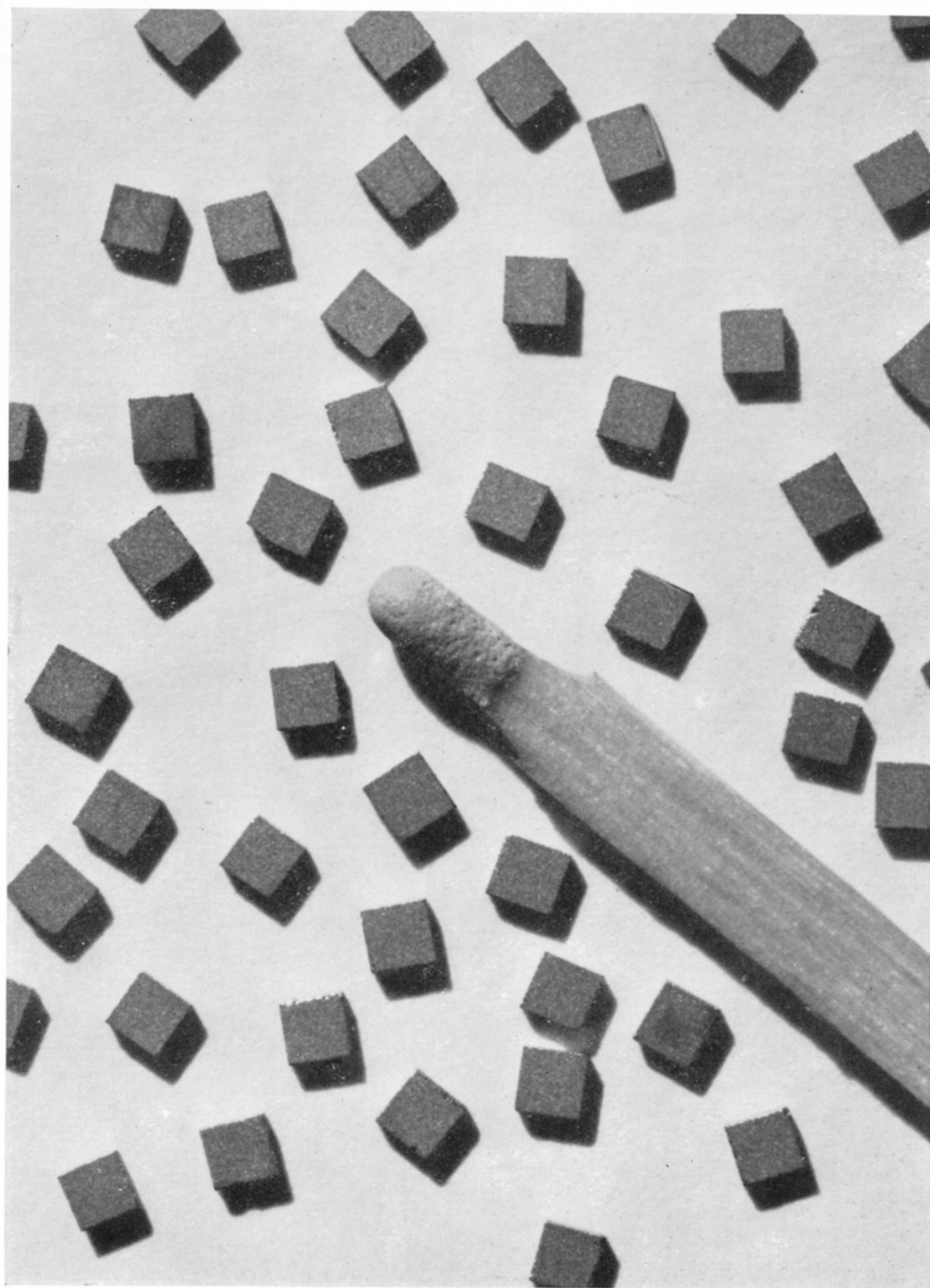



Fig. 8-4 – Schema di un forno per la fusione a zone.

della prima bobina, in cui è massimo il flusso concatenato, e quindi la corrente indotta, la sua temperatura diminuisce, ed il germanio fuso solidifica nuovamente. La navicella però continua ad avanzare, e pertanto ben presto l'estremità anteriore del lingotto si troverà sotto l'azione della seconda bobina, che la farà fondere ancora. Continuando sempre l'avanzamento del lingotto rispetto alle bobine, ad un dato istante esso sarà formato da più zone fuse (quelle sotto le bobine) intervallate da zone solide (fig. 8-5).

Man mano che una zona fusa avanza, il solido impuro fonde dalla parte anteriore, ed il materiale purificato solidifica dalla parte posteriore. Ogni zona fusa che passa attraverso il lingotto trascina una frazione delle impurità verso l'estremità che solidifica per ultima. Il

Piastrine di germanio per diodi a giunzione. Queste piastrine vengono ottenute col procedimento descritto a pag. 100.

grado di purificazione aumenta con l'aumentare del numero di passaggi (di una zona fusa), tendendo ad un limite finito, dopo un certo numero di passaggi.

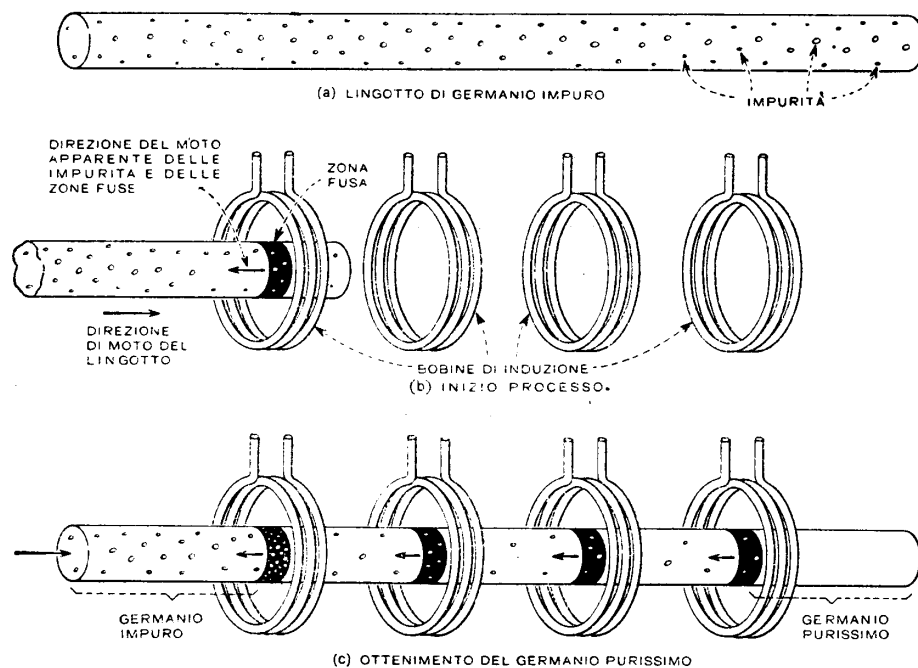



Fig. 8-5 – Tecnica della fusione a zone. Ogni zona fusa che passa attraverso il lingotto trascina con sè una frazione delle impurità, le quali si concentrano, di conseguenza, nella parte terminale del lingotto, chiamata « coda ». Il germanio che si ottiene presenta una concentrazione di impurità dell'ordine di un atomo estraneo su dieci miliardi di atomi di germanio.

Questa operazione riduce la concentrazione delle impurità, attraverso quasi tutta la lunghezza del lingotto, a meno di una parte su 10 000 000 000 di parti di germanio.

Il germanio purificato mediante raffinazione a zone è probabilmente il materiale più puro che si riesca oggi ad ottenere artificialmente.

CAPITOLO IX

FORMAZIONE DEL MONOCRISTALLO

9-1. Generalità.

Come si è visto nella prima parte del volume, è necessario che il germanio, il quale si può dire forma il cuore sia dei diodi che dei transistori, abbia una struttura cristallina perfettamente simmetrica, sia cioè formato da un unico cristallo.

Alcuni atomi di germanio costituenti il reticolo cristallino, devono inoltre venir sostituiti da altrettanti atomi di elementi con valenza diversa da quella del germanio. Si è anche visto quali siano questi elementi e come la loro presenza nell'interno del monocristallo di germanio dia origine alla formazione dei portatori di carica dei due tipi (elettroni e lacune).

Scopo del presente capitolo è di spiegare come avviene in sede di pratica attuazione, sia la sostituzione di alcuni atomi di germanio con atomi di elementi diversi, sia la formazione del monocristallo.

Eseguendo scrupolosamente tutte le operazioni finora descritte, si viene ad essere in possesso di un materiale di una purezza estrema, tale da poter senz'altro venir considerato come puro al 100%.

Per inciso si può dire che il germanio con un simile grado di purezza non trova alcuna applicazione pratica, eccezion fatta per i « semi » monocristallini, impiegati, come si vedrà in seguito, per il « tiraggio » del lingotto monocristallino.

Questo germanio purissimo si trova però sotto forma policristallina, ossia è formato da un grandissimo numero di cristallini, orientati a caso, statisticamente, in ogni senso possibile.

Si tratta quindi innanzitutto di « drogare » opportunamente il materiale puro, di fornirgli cioè quella piccolissima, ma esattissima quantità di impurezze che gli diano le caratteristiche necessarie per l'impiego

cui è destinato. Una volta drogato, il germanio deve venir portato sotto forma monocristallina, cioè si deve riuscire a formare un lingotto composto da un unico cristallo. Problemi questi, tutt'altro che facili, e che richiedono, per la loro buona riuscita, un'enorme esperienza pratica, ed una grandissima precisione di lavorazione.

Il drogaggio viene eseguito semplicemente aggiungendo al germanio fuso, protetto da atmosfera inerte, quantità opportunamente scelte e rigorosamente controllate di un determinato elemento (del III o del V gruppo, a seconda del tipo di germanio che si desidera ottenere). La quantità aggiunta dell'elemento «drogatore» o «inquinante», è dell'ordine di una parte su 100 000 000, quindi risulta evidente la precisione con cui va eseguita la pesata dell'impurità da aggiungere al germanio intrinseco.

Naturalmente queste impurità non vanno aggiunte da sole, cioè come elementi allo stato puro, perchè sarebbe praticamente impossibile eseguire una pesata del genere, ma bensì sotto forma di una lega a base di germanio. Il tenore di impurità presenti nella lega si rileva con estrema precisione misurandone la conduttività.

La formazione del monocristallo è invece un'operazione molto critica, che richiede particolari accorgimenti e rigorosi controlli.

I metodi per ottenere un monocristallo sono essenzialmente tre: mediante gradiente termico, mediante tiraggio per mezzo di un seme, mediante livellamento a zone.

9-2. Metodo del gradiente termico.

Si basa sul fatto che il germanio, allo stato solido, ha un peso specifico minore che allo stato liquido, per cui, in una miscela solido-liquido, i cristalli galleggiano sulla superficie della massa fusa. Raffreddando questa massa fusa dall'alto verso il basso, è possibile produrre monocristalli.

Questa operazione viene eseguita in un forno del tipo schematizzato in figura 9-1, che consiste di un crogiolo di porcellana in cui viene posto il germanio da trattare; di un contenitore di grafite per il crogiolo, circondato da una bobina, raffreddata mediante circolazione di acqua, e percorsa da una corrente a radio frequenza, fornita da un opportuno generatore (non indicato in figura); e da una camera protettiva di quarzo trasparente, in cui viene introdotto del gas inerte durante la lavorazione. Questa avviene nel seguente modo.

Dopo che la carica è stata riscaldata intorno ai 1200 °C per un periodo di 4 ÷ 5 minuti, la potenza viene diminuita, in modo che la

temperatura scenda intorno ai 965 °C. La bobina di induzione viene quindi abbassata molto lentamente, ad una velocità di circa 0,7 ÷ 0,8 millimetri al minuto, fino a che il primo cristallo si forma sulla sommità della massa fusa.

A questo punto il moto della bobina viene arrestato e la bobina viene mantenuta in quella posizione fino a che la sommità della carica di germanio non sia diventata solida. Quindi l'abbassamento viene ripreso, sempre alla stessa velocità, per una distanza pari all'altezza del lingotto.

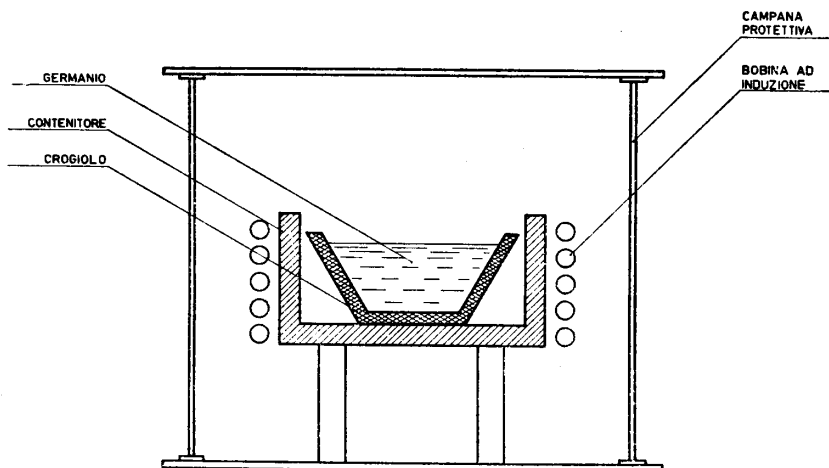



Fig. 9-1 – Forno per la formazione di monocristalli di germanio col metodo del gradiente termico.

Come principio, questo metodo di crescita di macrocristalli è piuttosto semplice.

In pratica invece sorgono difficoltà in gran numero, se si vuole realmente ottenere un solo monocristallo dalla carica totale.

Anzitutto è piuttosto raro che si avveri il fatto che un solo cristallo si formi e cresca sull'intera superficie della massa fusa. Più spesso se ne formano almeno due o tre, ed in tal caso può essere necessario rifondere tutto il materiale e ricominciare la lavorazione dal principio. Quando si riesce a produrre un solo macrocristallo, il fondo del lingotto, e spesso anche gli spigoli, possono contenere piccoli cristalli parassiti che si formano alla superficie del crogiolo. Tutti i lingotti ottenuti con questo metodo, poi, presentano una resistività variabile dalla sommità alla parte inferiore. Ciò è dovuto al fatto che, trattandosi di cristalliz-

zazione progressiva, le impurità contenute nel germanio tendono a concentrarsi nella zona solidificata per ultima, la quale presenta, di conseguenza, una resistività minore.

Ancora, si può osservare una variazione di resistività in senso radiale, e può anche accadere che nel lingotto vengano a formarsi regioni di tipo p e regioni di tipo n.

Per tutti questi inconvenienti il metodo è stato quasi da tutti ormai abbandonato, e le preferenze dei vari costruttori si rivolgono piuttosto agli altri due metodi.

9-3. Metodo del tiraggio mediante seme.

Il « seme » monocristallino non è altro che un piccolo lingotto, a sezione quadrata, di germanio purissimo. In generale la sua lunghezza si aggira sui $6 \div 7$ cm e viene usato per « innescare » il « tiraggio », sotto forma monocristallina, del germanio fuso.

È nota la proprietà delle sostanze cristalline di solidificare, in particolari condizioni di raffreddamento, formando una struttura reticolare perfettamente orientata, secondo gli assi di simmetria del primo macrocristallo che si forma. Nel metodo del tiraggio viene appunto sfruttata questa proprietà, con la differenza che il macrocristallo iniziale, anzichè formarsi spontaneamente, è costituito dal seme, il quale viene posto in contatto col germanio fuso e quindi sollevato lentamente verso l'alto. Il germanio fuso si trova ad una temperatura di pochi gradi superiore a quella di fusione, e perciò, quando, aderendo al seme, viene tirato verso l'alto, solidifica con rapidità, dato il gradiente di temperatura esistente fra l'interno del crogiolo e l'ambiente, appena al di sopra di esso.

L'operazione si svolge in un forno del tipo schematizzato in figura 9-2. La parte più delicata e sensibile di questo forno è costituita dal sistema di controllo della temperatura, che deve essere rigorosissimo. All'uopo provvedono speciali apparecchiature elettroniche, che consentono una regolazione finissima, ed un controllo di temperatura entro un campo di pochi decimi di grado centigrado. L'operazione di tiraggio avviene in atmosfera di gas inerte. Il forno per il tiraggio è munito, oltre che del termoregolatore elettronico, anche di un generatore di calore (per effetto Joule o a radiofrequenza) e di un motore che aziona il sistema di tiraggio. I movimenti impressi all'albero che effettua il tiraggio del lingotto sono due: trazione verticale e rotazione intorno al proprio asse.

Il complesso meccanico è progettato in modo tale da poter variare entrambi i movimenti, indipendentemente. Tutta la parte vibrante del

forno è montata su speciali ammortizzatori, che impediscono il trasferimento delle vibrazioni al lingotto in via di formazione.

Ciò è di capitale importanza perchè sia vibrazioni, che bruschi cambiamenti nella velocità di trazione o nella temperatura del crogiolo, portano quasi sempre alla formazione di parti policristalline e di geminature.

La messa a punto di un forno per il tiraggio di monocristalli di germanio comporta un gran numero di prove sistematiche e di successive variazioni sui parametri che influiscono sul risultato.

I due parametri che giocano un ruolo di primaria importanza sono la temperatura e la velocità di tiraggio. Nella regolazione e messa a punto di questo forno influiscono in gran parte l'abilità e l'esperienza degli operatori, ed in linea di massima si può perciò dire soltanto che un aumento, sia della temperatura del germanio fuso, che della velocità di innalzamento del seme, causano una diminuzione del diametro del lingotto in via di formazione.

Le operazioni si susseguono nel modo seguente.

Il germanio ottenuto dal procedimento di raffinazione a zone, ed il seme, subiscono anzitutto un attacco acido ed un lavaggio accuratissimo in acqua deionizzata, quindi vengono asciugati perfettamente. Il seme viene inserito nell'apposita testa a pinza di cui è munito l'albero mobile, ed il germanio puro viene posto nel crogiolo. Sistemato il crogiolo entro l'elemento riscaldante e chiuso il forno, vien fatto fluire il gas inerte con una portata variabile a seconda delle dimensioni del forno, per alcuni minuti, e ciò per assicurare un'atmosfera completamente inerte, priva della benchè minima traccia di aria, la cui presenza porterebbe ad un'immediata ossidazione del germanio fuso. Trascorso questo tempo di « lavaggio » del forno, si può iniziare il riscaldamento.

La potenza riscaldante disponibile deve poter venire finemente controllata entro un vasto campo. Inizialmente il germanio viene fatto fondere e la sua temperatura va innalzata di un centinaio di gradi al di sopra del punto di fusione, sia per assicurare una fusione completa, sia per determinare un buon mescolamento di tutta la massa fusa.

A questo punto, dall'alto del forno, attraverso il tubo di quarzo inserito nella camera del forno stesso, e la cui estremità è prossima alla superficie liquida del germanio, nella zona centrale del crogiolo, si fa cadere l'agente di drogaggio scelto.

Il riscaldamento viene quindi diminuito, e la temperatura fissata a qualche grado appena al di sopra del punto di fusione.

L'albero viene abbassato, ed il seme portato ad una distanza minima dalla superficie del germanio fuso, ma non a contatto con esso.

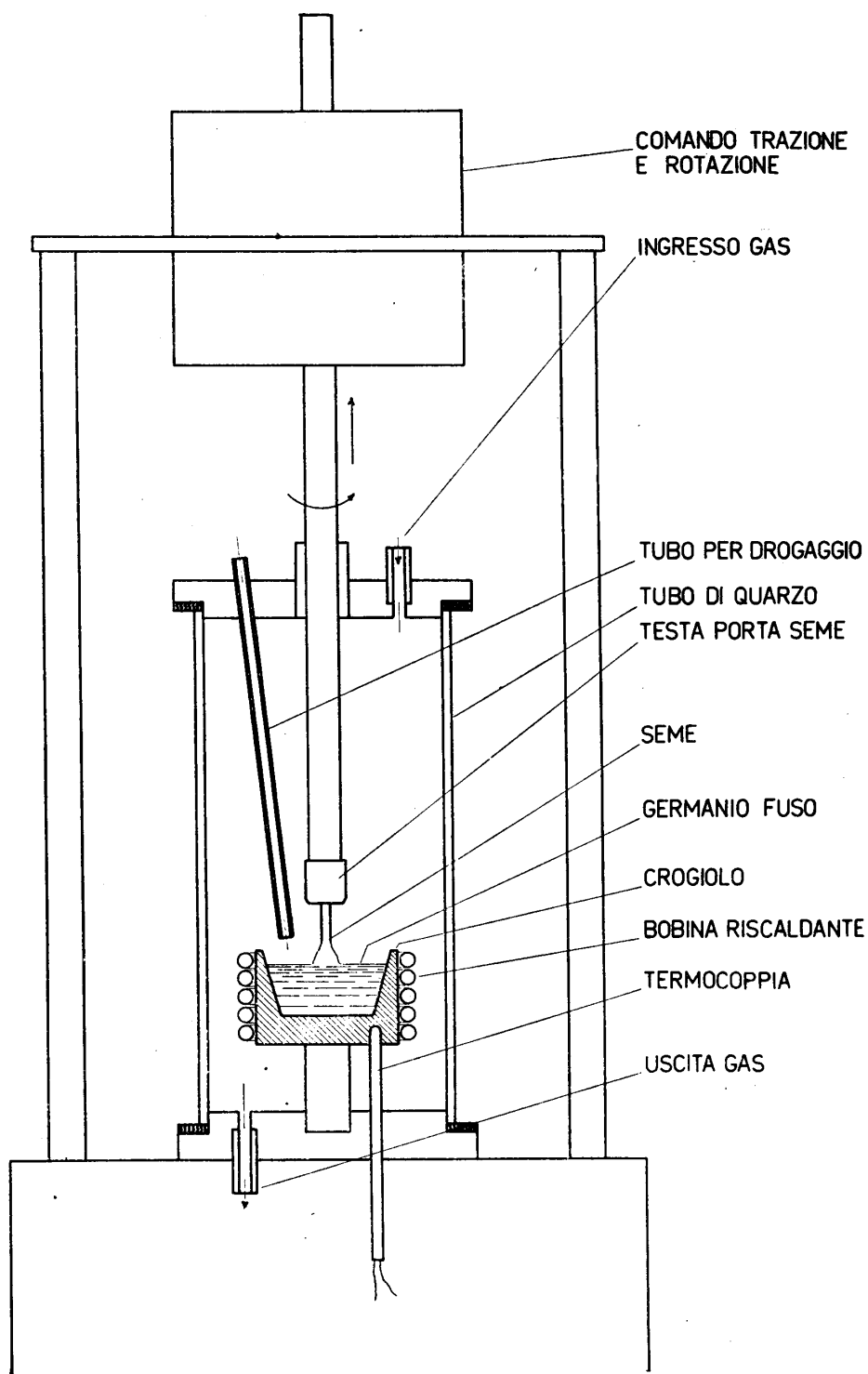



Fig. 9-2 – Forno di tiraggio per la produzione di lingotti monocristallini di germanio.

Trascorso un certo tempo, per dare modo sia al seme di portarsi in temperatura, sia al germanio fuso di raggiungere la temperatura prefissata, si abbassa ulteriormente l'albero mobile fino a che circa 3 millimetri di seme si immergono nella massa fusa.

L'aderenza fra germanio solido e germanio liquido si osserva bene, perchè, quando ciò avviene, si nota un bellissimo menisco nella zona di transizione, di un colore rosso brillante.

Quando il menisco è completo e si è quindi certi che non si hanno discontinuità di aderenza, si può iniziare il tiraggio del cristallo ad una velocità che varia a seconda del forno, ma che è sempre dell'ordine di pochi centimetri all'ora.

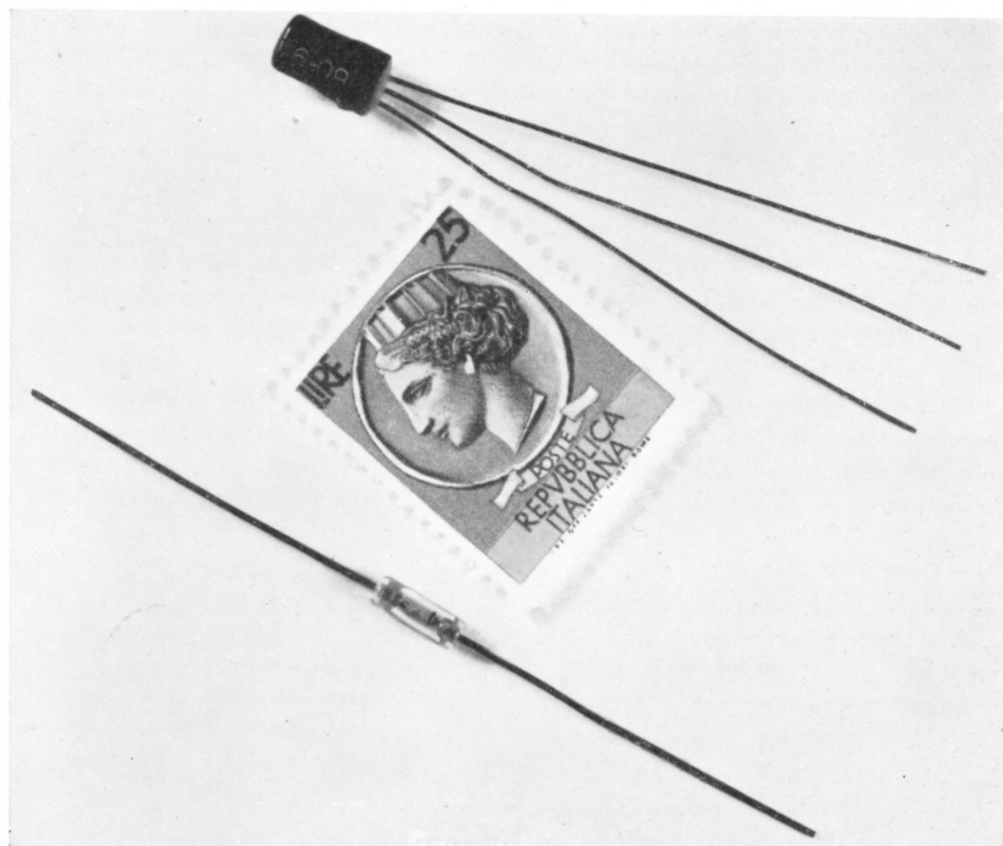
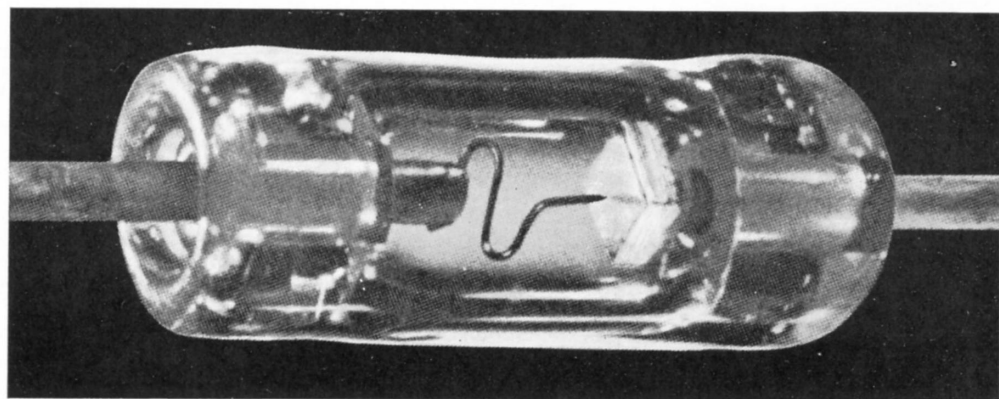
Man mano che il lingotto nasce, l'operatore deve osservarne le dimensioni e la forma. Regolando opportunamente temperatura e velocità si raggiunge il risultato voluto.

Estrema cura deve avere chi lavora in questa fase, nell'eseguire ogni variazione molto lentamente, per non arrischiare di compromettere irreparabilmente tutta la tirata. Va tenuto presente che non ha importanza anche se la prima parte del lingotto cresce con un diametro non desiderato, oppure cresce con diametri variabili, in seguito ai tentativi fatti per regolarne il tiraggio.

Nella tecnologia del germanio non va buttato via niente: qualunque operazione può sempre venir ripetuta, e il materiale si può sempre ricuperare.

Se anche di un lingotto si potrà utilizzare solo una parte, ciò non ha un'eccessiva importanza. Si asporta la parte utile ed il resto si rifonde. Sarà compito del tecnico decidere se ripetere il tiraggio tenendo conto del drogaggio già effettuato, oppure se passare la parte scartata all'operazione precedente per ripeterne la purificazione.

Supponendo che la regolazione sia stata messa a punto, e che quindi il lingotto cresca in modo uniforme e diritto, si avrà cura di non « tirare » mai tutto il germanio presente nel crogiolo, ma di lasciarne sempre una parte nel fondo del crogiolo stesso.

Quando si giudica giunto il momento di por fine al tiraggio, si aumenta molto la velocità di sollevamento dell'albero; la parte fusa allora non fa in tempo a solidificare, ed il lingotto solido esce dal crogiolo. Disserita l'alimentazione, si lascia raffreddare il lingotto fino almeno a $300 \div 400$ °C, ed appena allora si può interrompere il flusso di gas inerte. La parte di germanio che rimane e solidifica nel crogiolo, viene denominata « coda », e contiene in misura notevole le impurità aggiunte nella fase di drogaggio. Per una lavorazione su scala industriale questa coda viene utilizzata, addizionandole una quantità di germanio

Diodo a contatto puntiforme, subminiatura, in tutto vetro, e transistore a giunzione per bassa frequenza (rispettivamente a sinistra ed a destra del francobollo). Le dimensioni sono minime, ma non rappresentano ancora il limite della miniaturizzazione raggiungibile con i dispositivi a semiconduttori.

Un forte ingrandimento dello stesso diodo. Si possono vedere molto bene la piastrina di germanio ed il « baffo di gatto », che ne costituiscono i componenti essenziali (vedi pag. 101 e segg.).

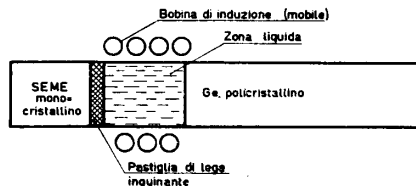
puro, pari (in peso) a quella tirata, e ripetendo l'operazione di tiraggio, senza però drogare nuovamente la massa fusa.

Naturalmente una stessa « coda » serve per un numero limitato di tiraggi.

9-4. Metodo del livellamento a zone.

Sono state attuate, finora solo in via sperimentale, diverse tecniche di livellamento per zone, aventi tutte lo scopo di introdurre un elemento solubile, nel modo più uniforme possibile, lungo tutto un lingotto solidificato.

Una di tali tecniche accoppia in un'unica operazione sia il drogaggio che la formazione del monocristallo. Ciò avviene nel seguente modo: un lungo lingotto di germanio policristallino puro, ottenuto col procedimento della raffinazione a zone, viene posto in una navicella.

Fig. 9-3 – Schema della formazione di monocristalli di germanio col metodo del livellamento a zone.

In testa al lingotto viene posto un seme monocristallino, e fra seme e lingotto, in apposita scanalatura, viene introdotta una piccola pastiglia di lega inquinante, contenente, per esempio, antimonio. La lega è tale da fornire il grado desiderato di conduttività elettrica al monocristallo da ottenere. Mediante una bobina di riscaldamento ad induzione, proprio nel punto di giunzione fra seme e lingotto, viene formata una zona fusa, quindi, spingendo il lingotto attraverso la bobina, si fa spostare lentamente la zona fusa.

L'apparecchio si vede in funzione nella figura 9-3.

Il motivo per cui si produce una concentrazione uniforme di antimonio, si può spiegare nel modo seguente.

Quando la zona fusa si sposta attraverso il lingotto, dietro ad essa si viene a formare un solido, la cui concentrazione di antimonio è sempre proporzionale a quella esistente nella zona. Siccome però la zona fusa è molto ricca di antimonio, in quanto contiene tutta la pastiglia di lega inquinante e la costante di proporzionalità per l'antimonio è molto piccola, circa 0,007, succede che la quantità di antimonio che rimane

nel germanio in via di solidificazione, è minima, e pertanto le concentrazioni dell'antimonio nella zona fusa e nel solido che si raffredda dietro ad essa, rimangono praticamente costanti.

Quando la zona raggiunge la fine del lingotto, comincia a contrarsi, facendo aumentare la concentrazione dell'antimonio nella fase solida. Però questa deviazione dall'uniformità è limitata ad una piccola regione nell'ultima parte del lingotto. Esperienze fatte hanno dimostrato che la concentrazione dell'antimonio, nel lingotto di monocristallo di tipo n ottenuto con questo procedimento, è uniforme per circa l'85 % della sua lunghezza.

CAPITOLO X

CONTROLLI SUL MONOCRISTALLO

Prima di passare al taglio del lingotto in piastrine ed alla loro successiva utilizzazione è indispensabile eseguirne un controllo molto accurato. Innanzitutto si tratta di constatare se effettivamente si è ottenuto un unico monocristallo, oppure se si sono formate geminature e parti policristalline.

Un attacco del lingotto mette subito in luce queste eventuali imperfezioni. Se il lingotto risulta costituito da un unico cristallo si passa alla misura delle caratteristiche elettriche del materiale. Generalmente le misure che si effettuano sono tre e precisamente la resistività, la costante di Hall, ed il tempo di vita dei portatori di corrente minoritari.

10-1. Resistività.

Esistono speciali apparecchiature per eseguire la misura della resistività del germanio monocristallino. Questa misura si effettua generalmente su di un campione prelevato dal lingotto, ma è anche possibile, qualora non si desideri tagliare il lingotto, effettuare una misura non distruttiva, cioè eseguire l'operazione sul lingotto completo, anzichè su una parte di esso.

Il metodo comunemente usato è quello delle quattro punte.

Lo accenniamo brevemente. A contatto con la superficie del campione in esame, vengono poste 4 punte di tungsteno, sagomate in modo speciale. Fra le due punte esterne viene fatta fluire una corrente nota, e si misura la caduta di tensione ai capi delle due punte interne. La distanza fra le due punte adiacenti è piccola, rispetto alle dimensioni del campione, e viene scelta in modo tale, che la misura della resisti-

vità si identifica con quella della resistenza, e quindi la lettura può venire effettuata direttamente, senza bisogno di eseguire alcun calcolo. L'assieme delle quattro punte può venir ruotato di 180° e spostato a piacimento facendolo scorrere su apposite guide, allo scopo di poter ispezionare punti diversi.

10-2. Costante di Hall.

Questa misura si basa sul fenomeno noto come effetto Hall e descritto nella prima parte del presente volume.

L'attuazione pratica della misura viene effettuata nel modo seguente.

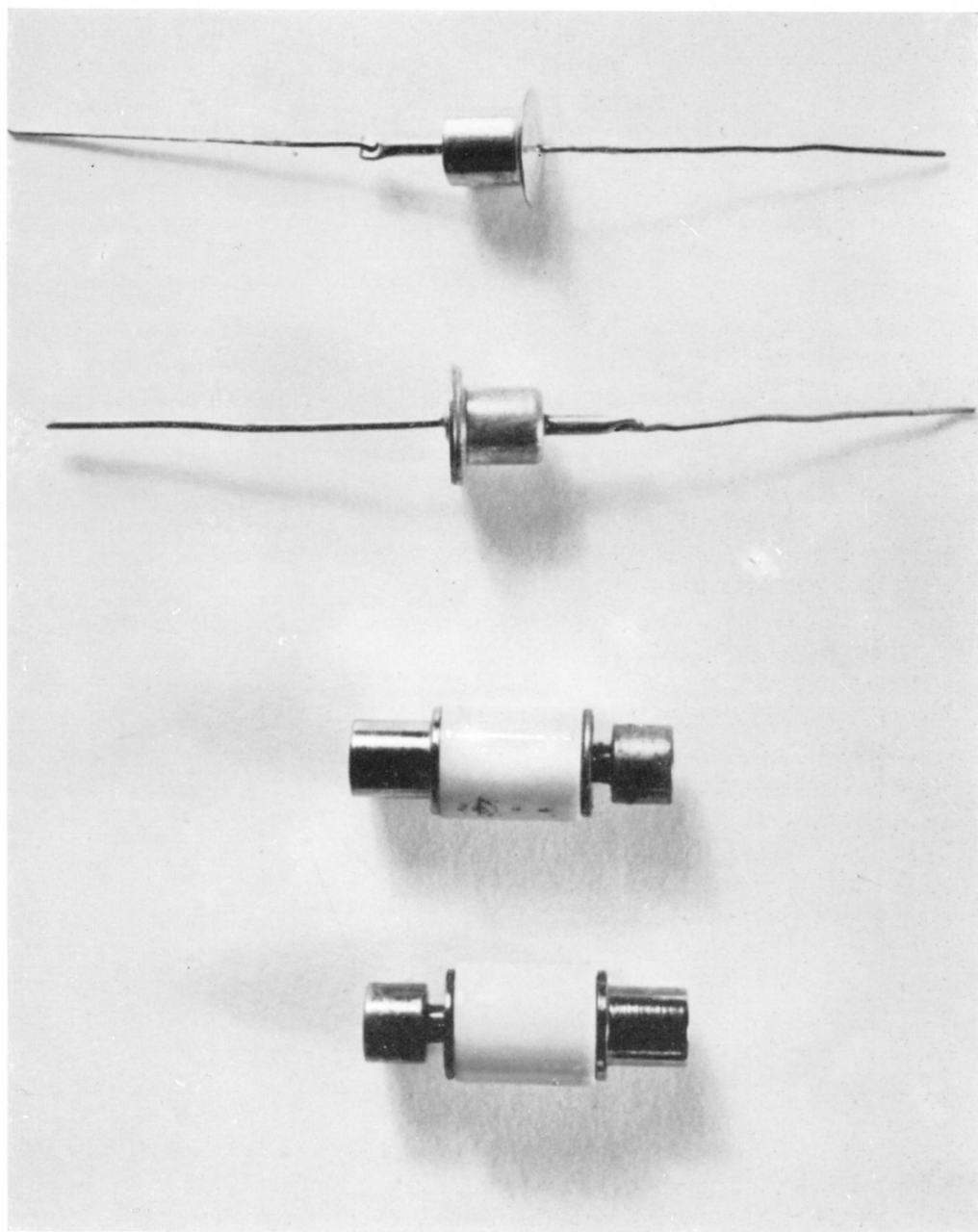
Con riferimento alla fig. 10-1 *a*, il campione di germanio da misurare, sagomato in forma di piastrina rettangolare, lappata e con i lati minori ramati, allo scopo di assicurare un contatto perfetto, viene introdotto in un apposito contenitore isolante (non indicato in figura per semplicità) munito di quattro fenditure in corrispondenza alla mezzaria di ciascun lato della piastrina.

Attraverso queste 4 fenditure, altrettante punte metalliche vengono poste in contatto con le superfici laterali della piastrina. Attraverso le due punte in contatto con i lati minori, ramati, viene fatta fluire una debole corrente continua nota. Le altre due punte vengono collegate ad un voltmetro a valvola, il quale indicherà una differenza di potenziale dell'ordine dei microvolt, dovuta al fatto che le due punte non si trovano, in generale, alla stessa distanza da una delle estremità della piastrina, scelta come origine.

Mentre una delle due punte rimane bloccata, l'altra viene spostata, con avanzamento micrometrico, nel verso in cui la differenza di potenziale indicata dal voltmetro tende a diminuire, e questo spostamento viene continuato fino a che si riesce ad azzerare lo strumento. In questa posizione la punta viene bloccata.

L'elettromagnete, il cui campo H fra le espansioni polari è perfettamente noto, viene allora portato nella posizione indicata in figura 10-1 *b*, in modo che il campo magnetico attraversi in pieno la piastrina, perpendicolarmente al campo elettrico già impresso.

Come si è visto nella prima parte, si origina un campo risultante, sfasato rispetto a quello esistente in precedenza, e pertanto le due punte collegate al voltmetro cessano di essere equipotenziali, e lo strumento indica una tensione.

Dalla formula 2-32 si ricava il valore della costante di Hall.

Diodi raddrizzatori del tipo a giunzione.
I due superiori, muniti di reofori, sono al germanio, e possono raddrizzare 75 mA alla tensione di 300 volt; i due inferiori, senza reofori, sono al silicio e raddrizzano 500 mA alla medesima tensione.
Questi sono tipi di uso comune, ma la gamma di potenze è molto estesa, ed arriva a valori di qualche kW per ciascun elemento (vedi pag. 104 e segg.).

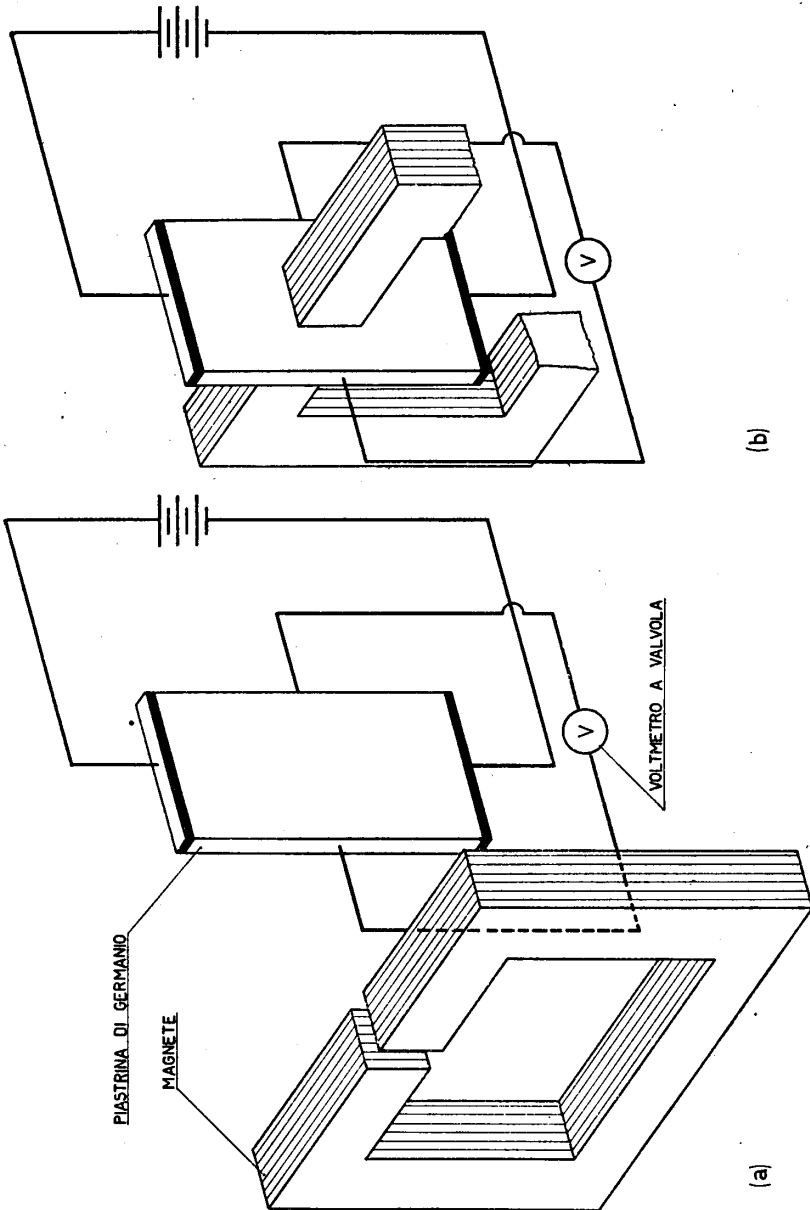



Fig. 10-1 – Apparecchiatura per la misura della costante di Hall:
a) posizione azzeramento; *b*) posizione di lettura.

10-3. Tempo di vita dei portatori di corrente minoritari.

La definizione dei portatori di corrente minoritari è già stata data in precedenza, ma sarà forse bene ribadirne il concetto.

Come si è già visto, in un semiconduttore la corrente può venir trasportata in due modi diversi, mediante elettroni e mediante lacune e precisamente, in un campione di germanio di tipo *n*, cioè inquinato con un elemento appartenente al V gruppo della tavola periodica degli elementi, denominato donatore, la conducibilità elettrica sarà dovuta agli elettroni, mentre in un campione di germanio di tipo *p*, cioè inquinato con un elemento appartenente al III gruppo della tavola periodica degli elementi, denominato ricettatore, la conducibilità elettrica sarà dovuta alle lacune. Sia nell'uno che nell'altro caso, però, se dall'esterno si fornisce un impulso energetico, che può essere di varia natura (onde elettromagnetiche, calore, ecc.) e se l'energia fornita è sufficiente, accade che uno o più elettroni possono passare dalla banda di valenza a quella di conduzione. In questo caso allora si vengono a creare coppie lacune-elettroni, che, sotto l'azione di un campo impresso, partecipano entrambi alla conduzione, il che porta come conseguenza ad una diminuzione della resistività del materiale. Se ciò avviene in un campione di germanio di tipo *n*, i portatori minoritari sono le lacune, se ciò avviene in un campione di germanio di tipo *p*, i portatori minoritari sono gli elettroni. La creazione di questi portatori porta ad uno squilibrio nella struttura cristallina del materiale, in quanto le lacune e gli elettroni così formati costituiscono un'anomalia transitoria, non un'anomalia stabile, come avviene invece quando un atomo di germanio (tetravalente) viene sostituito con un atomo di un elemento trivalente o pentavalente, e quindi questo squilibrio ha una durata limitata. La lacuna di una coppia viene ben presto saturata dal primo elettrone che entra nella sua sfera d'azione, e l'elettrone della stessa coppia viene altrettanto presto saturato dalla prima lacuna che incontra sul suo cammino.

La durata di questo transitorio, costituisce il tempo di vita, e sta ad indicare proprio la quantità di tempo che intercorre fra la formazione di una coppia lacuna-elettrone e la sua saturazione ad opera di portatori di carica di segno opposto.

È evidente come la misura del tempo di vita, che nel germanio può variare da qualche microsecondo ad alcune centinaia di microsecondi, possa dare un'idea del comportamento del semiconduttore estrinseco che viene controllato.

Per eseguire questa misura, si impiega un'apparecchiatura, che,

nella maggior parte dei casi, fa uso di una sorgente di impulsi luminosi quale fonte di energia per la creazione delle coppie di portatori di carica di segno opposto. La lunghezza d'onda della sorgente luminosa viene sempre scelta entro il campo in cui il germanio presenta la massima sensibilità.

Il principio di funzionamento si basa sul rilevamento della risultante modulazione di conduttività del germanio.

Il campione da misurare, deterso ed attaccato chimicamente, viene situato in uno speciale contenitore, cui fanno capo due fili conduttori che assicurano un contatto ohmico perfetto con il germanio in prova. Per mezzo di questi due fili, al campione da misurare viene applicata una certa tensione.

Nel semiconduttore in prova scorre pertanto una corrente inversamente proporzionale alla resistenza da esso offerta.

L'impulso luminoso, che va a colpire la superficie del campione in esame, genera un aumento della sua conduttività, e pertanto si ottiene in definitiva un aumento dell'intensità della corrente che lo percorre.

Quando l'impulso ha termine, i portatori in eccesso formatisi si ricombinano con una velocità ad andamento esponenziale, e la conduttività tende a ritornare al valore primitivo, valore che viene raggiunto entro un certo tempo.

Se l'impulso viene fornito con una determinata frequenza, sincronizzata con quella di un oscillografo, si possono rivelare le variazioni dell'intensità di corrente, e dal «tempo di caduta» della conduttività dal suo valore massimo al suo valore iniziale (più precisamente ad $1/e$ del suo valore massimo) si può risalire al tempo di vita medio dei portatori minoritari in eccesso.

Altri principi teorici possono venir impiegati in pratica, ma il più diffuso è quello esposto, specialmente per l'attendibilità dei risultati che fornisce.

CAPITOLO XI

MONTAGGIO IN SERIE DI DIODI E TRANSISTORI

11-1. Taglio del lingotto.

Le misure effettuate su di un lingotto, o su parte di esso, ne suggeriscono l'impiego.

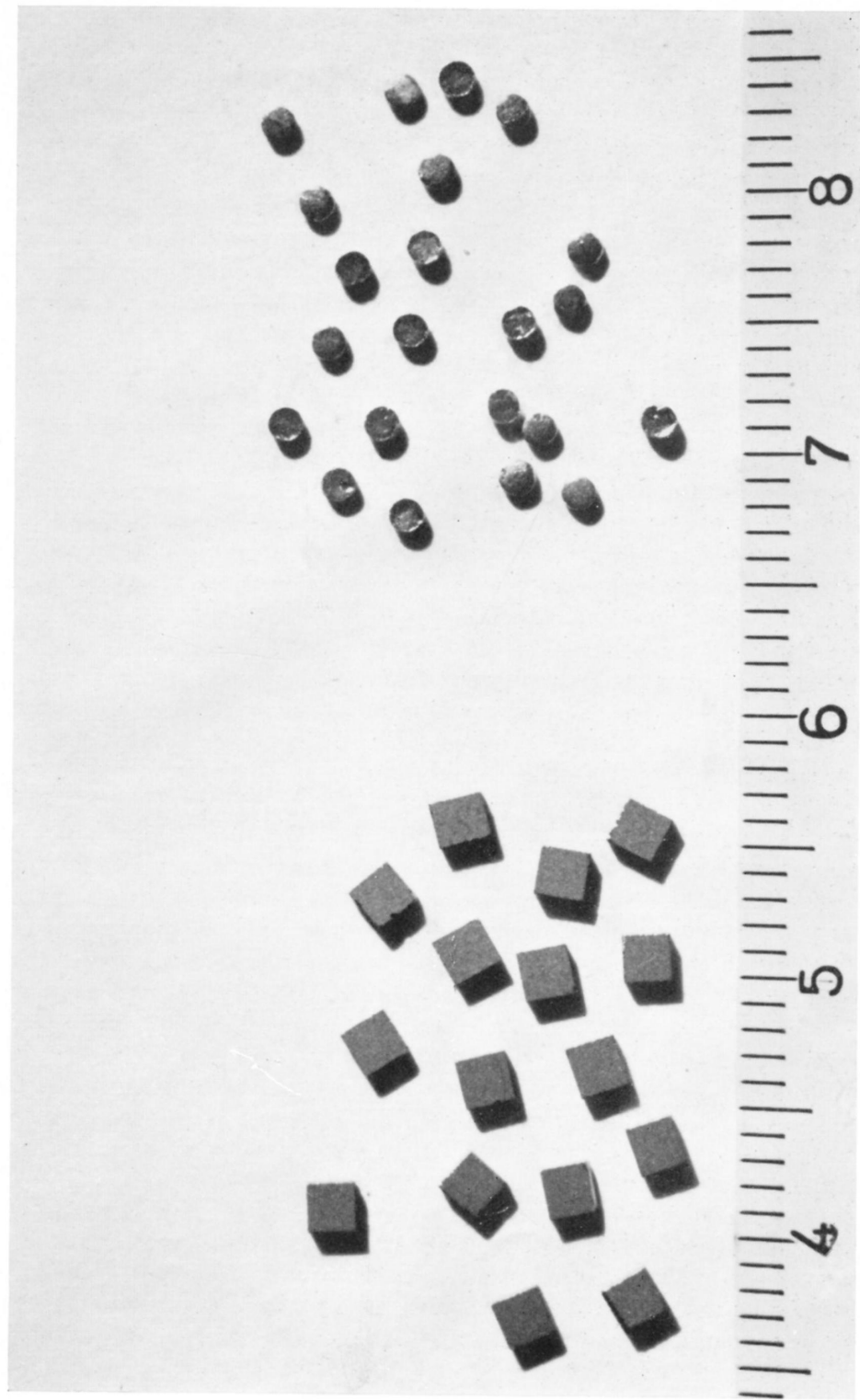
Infatti, le qualità, o per meglio dire, le varie proprietà di un lingotto monocristallino, ottenuto con i metodi fin qui descritti, sono controllabili solo entro certi limiti.

Inoltre un'estremità del lingotto presenta caratteristiche che in generale si differenziano (e talvolta anche notevolmente) da quelle dell'estremità opposta.

Si verifica sempre, in pratica, una variazione, più o meno spinta, a seconda dei casi, delle proprietà del materiale delle diverse zone di uno stesso lingotto, variazione specialmente sentita in senso assiale.

Siccome, a seconda dell'impiego cui è destinato, il germanio va tagliato in piastrine di forma e dimensioni diverse, da parte dei vari costruttori sono state fissate svariate « categorie » di germanio, destinata ognuna ad un ben determinato scopo, ed avente dei limiti ben definiti dei valori delle singole caratteristiche.

Pertanto, in generale, un lingotto viene tagliato lungo piani perpendicolari al suo asse, in tante fette o pastiglie, di spessore variabile a seconda dei casi, ma che di solito si aggira sul millimetro. Questa operazione viene eseguita mediante una sega rotante a disco diamantato, con avanzamento idropneumatico.

Il cristallo di germanio è molto duro e fragilissimo, per cui, se nel taglio non si usano speciali precauzioni, si corre il rischio di causare delle rotture con conseguente spreco di materiale ed aumento del costo di produzione. È proprio per questo motivo che la sega per tagliare i lingotti non è munita di avanzamento automatico continuo, ma bensì

Componenti per diodi a giunzione. A sinistra le piastrine di germanio di tipo *n*, a destra i dischetti di indio, destinati a diffondere nel germanio ed a trasformarlo, parzialmente, nel tipo *p* (vedi pag. 104 e segg.).

di un dispositivo idropneumatico che ha lo scopo di ottenere una pressione costante dell'utensile sul materiale.

Particolari accorgimenti vanno presi per quanto riguarda il raffreddamento del disco, ed il ricupero della polvere di germanio.

Una volta ottenute le pastiglie ed eseguiti i controlli, queste vengono smistate a seconda degli usi cui sono destinate, e si inizia il taglio in piastrine. Come si è già detto, la forma e le dimensioni delle piastrine variano a seconda dell'impiego che se ne vuol fare, però si tratta sempre di ottenere o quadrati o rettangoli uguali fra loro. Ciò si ottiene con la stessa sega.

Le pastiglie di sezione circolare precedentemente ricavate vengono incollate con uno speciale adesivo su di una tavoletta di vetro o di plexiglas, e la tavoletta viene sistemata sul piano orientabile della sega. Sul mandrino viene inserita una serie di dischi diamantati opportunamente distanziati e viene eseguita la prima passata, che opera il taglio in un senso. Successivamente il piano orientabile viene fatto ruotare di 90°, e si esegue la passata in senso normale al precedente, con la stessa serie di dischi, se si vogliono ottenere piastrine quadrate, con una serie di dischi distanziati in modo diverso dal precedente, se si vogliono ottenere piastrine rettangolari. Terminate le due operazioni di taglio, le piastrine vengono staccate dalla lastra di vetro con un solvente adatto, pulite e fatte asciugare.

11-2. Montaggio dei diodi a contatto puntiforme.

Le piastrine da usare nel montaggio di diodi a contatto puntiforme, sono di sezione quadrata di circa un millimetro e mezzo di lato e di uno spessore che è il minimo che si riesce ad ottenere nell'operazione di taglio. Queste piastrine subiscono un leggero attacco acido ed un rigoroso lavaggio in acqua deionizzata.

Una volta asciutte sono pronte per l'impiego.

I diodi a contatto puntiforme, costruttivamente, sono fatti tutti nello stesso modo. L'unica cosa che varia da fabbricante a fabbricante è il contenitore. Esistono infatti diodi chiusi in capsule di plastica, o di vetro, o di ceramica e metallo.

La tendenza attuale si orienta sulla chiusura in vetro, sia perchè è conveniente dal punto di vista economico, sia, e specialmente, per la tenuta ermetica che si riesce ad ottenere con questo sistema. Il problema della tenuta è infatti essenziale in tutti i prodotti che impiegano semiconduttori. Anche tracce di umidità che penetrino all'interno del complesso, ne compromettono immancabilmente il funzionamento. Il

montaggio dei diodi a contatto puntiforme consiste essenzialmente nella preparazione delle due parti che lo costituiscono e nella sua chiusura.

In figura 11-1 è disegnato in forma schematica un diodo di questo tipo.

Il reoforo inferiore è collegato al supporto su cui è saldata la piastrina di germanio.

Il reoforo superiore è collegato al supporto su cui è saldato il baffo di gatto. Si dà il nome di « baffo di gatto » al filo impiegato per la formazione del contatto. Questo filo è molto sottile ed appuntito; inoltre è sagomato in modo tale da esercitare una certa pressione sulla piastrina, prima della formazione, senza deformarsi in maniera incontrollabile.

Fig. 11-1 – Schema di un diodo a contatto puntiforme.

La parte sagomata del filo lavora come una molla, e la sua funzione è essenziale per la durata del diodo, perchè consente di non sottoporre mai il punto di contatto a degli sforzi meccanici (dovuti ad urti, o a sollecitazioni termiche) che potrebbero danneggiarlo o addirittura staccarlo dalla piastrina.

Nel punto in cui si ha il contatto fra baffo e piastrina, si forma la zona raddrizzante. I reofori vengono uniti ai rispettivi supporti mediante semplice saldatura elettrica di testa. Successivamente sui supporti inferiori viene stagnata la piastrina di germanio. L'operazione si svolge nel modo seguente.

Due elettrodi sagomati vengono portati in contatto col supporto ed attraverso ad esso viene fatta passare una corrente che lo porta ad una temperatura di circa 400°. Ponendo su di esso un dischetto di stagno, questo fonde, e, quando la corrente viene tolta, solidifica immediatamente. Sullo strato di stagno così formatosi, viene posta la piastrina di germanio, ed il supporto viene nuovamente riscaldato e lo stagno fatto rifondere con lo stesso sistema. L'aderenza fra il germanio e lo stagno fuso, che si ottiene in tal modo, è ottima, e la piastrina di germanio risulta stagnata in modo perfetto sul suo supporto; però alcuni costruttori, allo scopo di migliorare ancora la perfezione della stagnatura, usano ramare per via elettrolitica una delle facce della piastrina di germanio. È molto importante che la stagnatura del germanio al supporto sia perfetta, perchè in caso contrario si può formare una resistenza di contatto che viene a trovarsi in serie al diodo, ed il cui valore, trascurabilissimo rispetto alla resistenza inversa del diodo,

ma non trascurabile rispetto alla sua resistenza diretta, può alterare notevolmente la caratteristica diretta del diodo. Sui supporti superiori devono venir fissati i baffi di gatto.

Questa operazione viene eseguita per mezzo di una saldatura elettrica, che richiede l'impiego di una saldatrice a scarica di condensatori, la quale consente di effettuare la saldatura fra il baffo di gatto, che ha un diametro di alcuni centesimi di millimetro, ed il supporto, il cui diametro invece è dell'ordine di qualche millimetro.

Una tecnica molto diffusa per eseguire questa operazione consiste nel dare la sua forma caratteristica al baffo di gatto, dopo aver effettuata la saldatura al supporto. A questo scopo viene impiegata una speciale attrezzatura che non è possibile qui descrivere in dettaglio, ma di cui sarà sufficiente accennare il funzionamento. Il filo (che può essere di bronzo fosforoso, o di una lega a base di tungsteno o platino-rutenio, od oro, a seconda dei tipi) con cui vengono formati i baffi di gatto, è avvolto su di una bobina. Il capo libero del filo viene adagiato di fianco sul supporto e la saldatrice provvede a fissarli assieme con uno o due punti di saldatura. Successivamente entra in azione un ferro sagomato che dà al filo la sua forma caratteristica, e da ultimo interviene una speciale taglierina, che taglia il baffo di gatto a forma di becco di flauto. Piegato il filo ad angolo retto, in modo da renderlo coassiale col supporto, il pezzo è pronto.

L'operazione che segue è la più delicata di tutto il procedimento. Si tratta della «formazione» del complesso rettificatore, e viene eseguita su di un'altra attrezzatura speciale. Questa attrezzatura consiste essenzialmente di un dispositivo ad avanzamento micrometrico, che serve per avvicinare il baffo di gatto alla piastrina di germanio; di una debole sorgente di corrente continua, munita di strumento indicatore, che serve a segnalare l'avvenuto contatto; di un'altra sorgente di corrente continua, che serve a fornire gli impulsi atti a determinare la formazione del contatto; e di un circuito di collaudo.

Le operazioni si susseguono nel modo seguente. Dalle estremità opposte di un tubetto, di plastica o di vetro, a seconda dei casi, vengono introdotti il supporto inferiore con la piastrina di germanio ed il supporto superiore con il baffo di gatto.

I due supporti sono alloggiati ciascuno in un'apposita guida; al supporto superiore è connesso il polo positivo di una batteria, al supporto inferiore è connesso il polo negativo.

Mediante il dispositivo di avanzamento micrometrico, il supporto munito del baffo di gatto avanza lentamente verso la piastrina di germanio. Quando la tocca, il circuito si chiude, ed un galvanometro, in

esso inserito, dà l'indicazione di un passaggio di corrente. L'avanzamento viene fatto proseguire ancora per qualche centesimo di millimetro, allo scopo di esercitare una certa pressione del baffo di gatto sulla piastrina di germanio, e quindi la posizione raggiunta viene bloccata. A questo punto, mediante la sorgente di corrente continua, comandata da un regolatore a tempo, vengono impressi due o tre impulsi rapidissimi di corrente, i quali hanno lo scopo di formare il contatto raddrizzante.

La teoria della «formazione» è esposta nel cap. IV.

Eseguita la formazione, il diodo è pronto.

Senza spostarlo dall'apparecchiatura, mediante un commutatore, viene inserito nel circuito di prova. Si collaudano alcuni punti della sua curva caratteristica. Se la formazione dovesse risultare non soddisfacente, gli impulsi possono venir ripetuti ed i vari punti ricontrollati. Il diodo collaudato viene allora estratto dall'apparecchiatura e passato alla chiusura. Quest'ultima operazione viene eseguita con criteri diversi a seconda del materiale di cui è formato il contenitore, ed a seconda del fabbricante.

11-3. Montaggio dei diodi a giunzione.

La lavorazione necessaria per la costruzione dei diodi a giunzione è molto più complessa e difficile di quella per i diodi a contatto puntiforme.

Oltre ai problemi di tenuta, molti altri se ne aggiungono, come per esempio quelli concernenti la dissipazione del calore, l'attacco chimico, il lavaggio, la chiusura, la vuotatura, per citare solo i principali.

Infatti, mentre nel caso dei diodi a contatto puntiforme, una volta ottenuta la formazione dello strato barriera, si può dire che il diodo sia finito, o quasi, nel montaggio dei diodi a giunzione ci si trova di fronte ad un susseguirsi di operazioni, tutte sommamente critiche e tutte tali da poter danneggiare irrimediabilmente il complesso in costruzione. Unico vantaggio è quello di poter controllare, passo per passo, il risultato di ogni operazione eseguita, per cui è possibile effettuare ritrattamenti e sottrarre gli scarti alle operazioni successive.

Lo strato barriera, in questi complessi, si ottiene facendo «diffondere» un elemento del III gruppo della tavola periodica, per esempio indio o gallio, in una piastrina di germanio di tipo *n*. Questa diffusione si ottiene ponendo una piccola pastiglia, per esempio di indio, a contatto diretto con una piastrina di germanio tipo *n*, e riscaldando l'assieme ad una temperatura intermedia fra quella di fusione dell'indio e

quella di fusione del germanio. L'indio fonde, forma una lega col germanio solido della piastrina, e diffonde in essa. Ad ogni temperatura corrisponde una velocità di diffusione, velocità che aumenta con la temperatura.

Ora, regolando opportunamente il tempo e la temperatura, si ottiene una condizione di optimum della diffusione, per cui le caratteristiche elettriche del diodo sono le più soddisfacenti.

Nella prima parte si è visto come avviene, in linea teorica, l'effetto raddrizzante. Un diodo era schematizzato come una barretta divisa a metà, di cui una parte era costituita di germanio tipo *n*, e l'altra di germanio tipo *p*. In effetti non è così.

Immaginando di percorrere il cammino, partendo dalla parte non diffusa della piastrina di germanio, si incontrerà dapprima un materiale di tipo *n*, cioè, in una struttura monocristallina di germanio, si troveranno degli atomi di elementi donatori, facenti parte della struttura, e degli elettroni liberi; poi cominceranno a comparire alcuni atomi di indio ed alcune lacune, che aumenteranno di numero man mano che si avanzerà, fino a che, ad un certo istante, ci si troverà in un punto in cui il germanio sarà intrinseco, cioè il numero delle lacune sarà perfettamente uguale a quello degli elettroni liberi. Avanzando ancora si troverà un materiale di tipo *p*, cioè si osserverà una prevalenza sempre più forte delle lacune sugli elettroni liberi, e degli atomi di indio su quelli dell'elemento donatore, fintantochè la struttura monocristallina finirà, e ci si troverà nell'indio puro. Ciò è illustrato in figura 11-2.

Fig. 11-2 – Schema di un diodo a giunzione.

Siccome i tipi di diodi a giunzione sono moltissimi, e di potenze svariatissime, anche le dimensioni delle piastrine variano enormemente da un tipo all'altro.

La gamma di prestazione dei raddrizzatori a giunzione copre un campo di tensioni inverse che va da una decina ad alcune centinaia di volt, ed un campo di correnti dirette che va da una cinquantina di milliampere ad alcuni ampere.

La tecnica costruttiva è però sempre la stessa, almeno nelle sue linee generali, ed in via di massima verrà ora descritta.

Anzitutto le piastrine di germanio devono subire un attacco acido con una miscela di acidi fortissimi, e quindi devono venir lavate molto accuratamente con acqua deionizzata ed asciugate completamente.

Un apposito fondello di un'opportuna lega metallica viene ricoperto nella sua parte centrale da un sottile strato di stagno, e su questa zona stagnata viene posta la piastrina di germanio.

Al centro della piastrina viene sistemata la pastiglia di indio, e tutto l'assieme viene introdotto nel forno in cui avverrà la diffusione. Questo è un forno speciale, a tunnel, munito di un nastro trasportatore su cui vengono posti i complessi da diffondere. La velocità del trasportatore e la temperatura del forno sono regolate in modo tale che all'uscita la diffusione è avvenuta nel migliore dei modi.

In generale, un riscaldamento eccessivo o un tempo troppo prolungato provocano una diffusione rapida e totale, con corto circuito

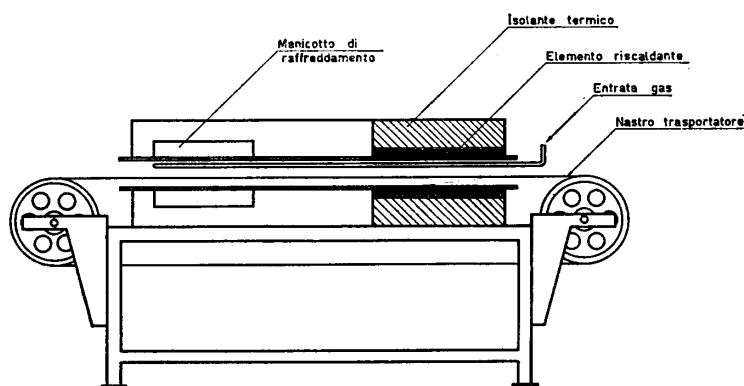



Fig. 11-3 – Forno di diffusione.

attraverso il germanio, mentre un riscaldamento insufficiente od un tempo troppo breve, dànno luogo a caratteristiche dirette non buone.

Il forno è schematizzato in figura 11-3, e consta essenzialmente di due parti: una zona riscaldante, ed una zona raffreddante.

Un lungo tubo di acciaio inossidabile guida il nastro trasportatore e mantiene l'atmosfera inerte. Il gas entra da un tubetto che si trova sulla parte interna superiore del tubo di acciaio inossidabile, ed esce al centro del forno, attraverso una serie di fori di vari diametri ed opportunamente distanziati fra loro.

I complessi da diffondere vengono caricati sul nastro trasportatore, alloggiati in apposite sedi, e vengono così introdotti nel forno. Quando entrano nella zona riscaldante, l'indio fonde, ed ha luogo la diffusione.

Il meccanismo che regola la diffusione dell'indio nel cristallo, può essere dedotto dal diagramma di solubilità In-Ge, rappresentato in figura 11-4.

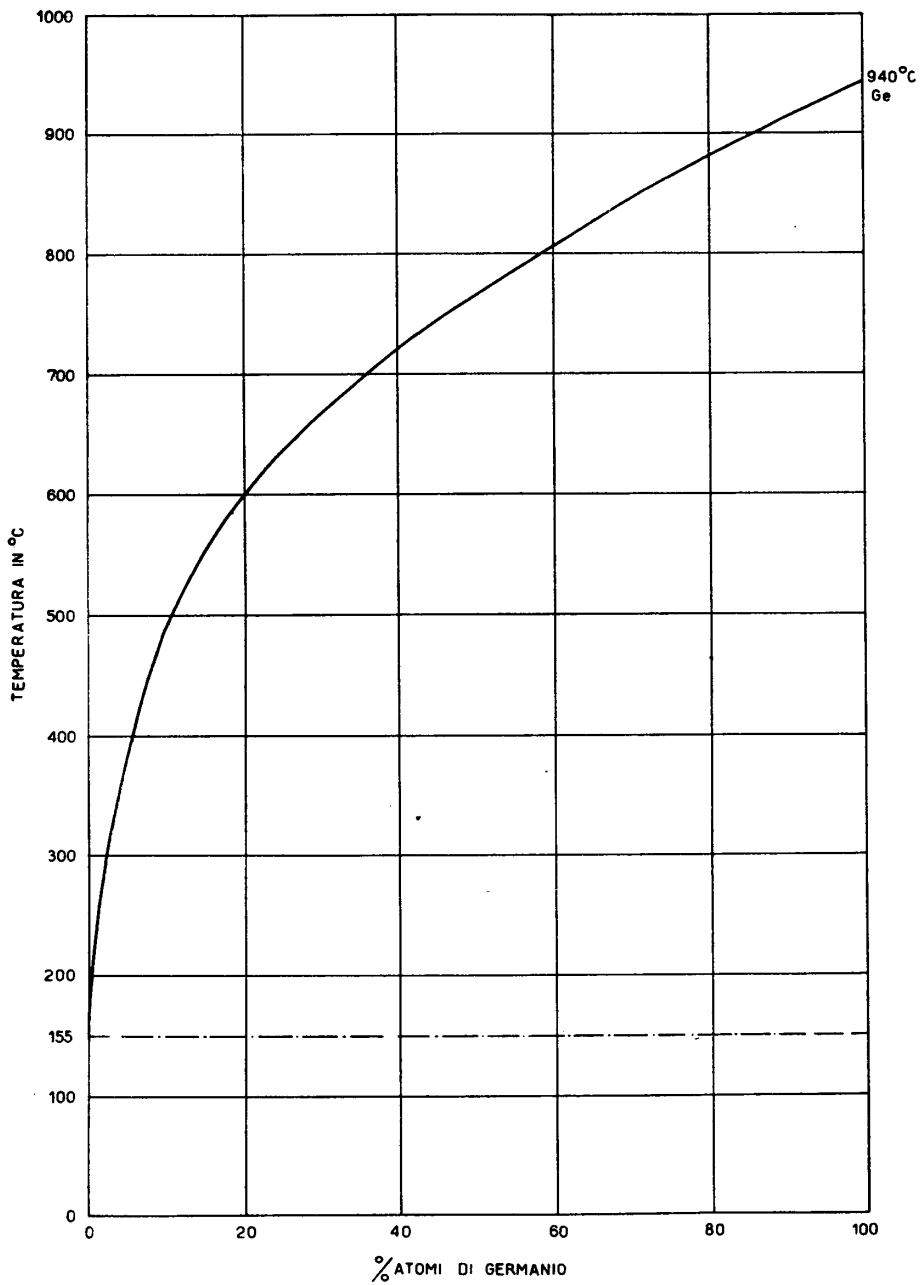



Fig. 11-4 – Diagramma di solubilità In-Ge.

Quando l'indio fonde, il germanio col quale è a contatto, si lega con esso, la temperatura e la concentrazione aumentano progressivamente, ed il punto rappresentativo si sposta lungo la curva. Quando la temperatura voluta viene raggiunta, la penetrazione dell'indio è molto più lenta, perchè si ottiene una soluzione satura di germanio.

Se si traccia la curva rappresentativa della concentrazione relativa dell'indio in funzione dello spessore del cristallo, si ottiene il diagramma della figura 11-5. Nella regione superiore si è in presenza di una lega indio-germanio, che ha le proprietà di un metallo, piuttosto che quelle di un semiconduttore di tipo *p*.

Poi la concentrazione dell'indio cala molto rapidamente, fino ad equilibrare la concentrazione di impurità del semiconduttore di tipo *n*. Ci si trova ai confini della giunzione.

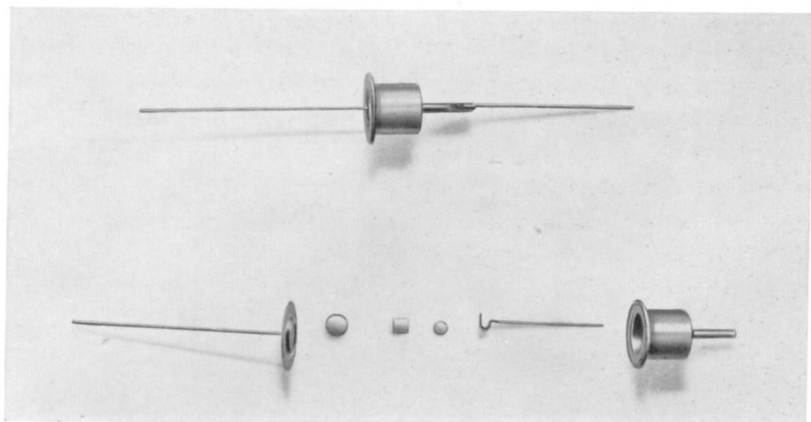
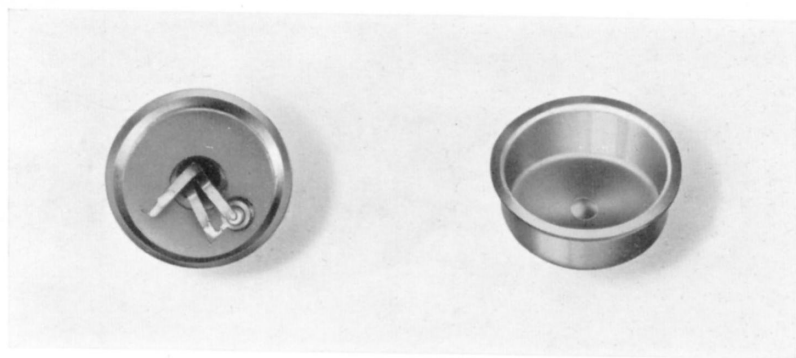
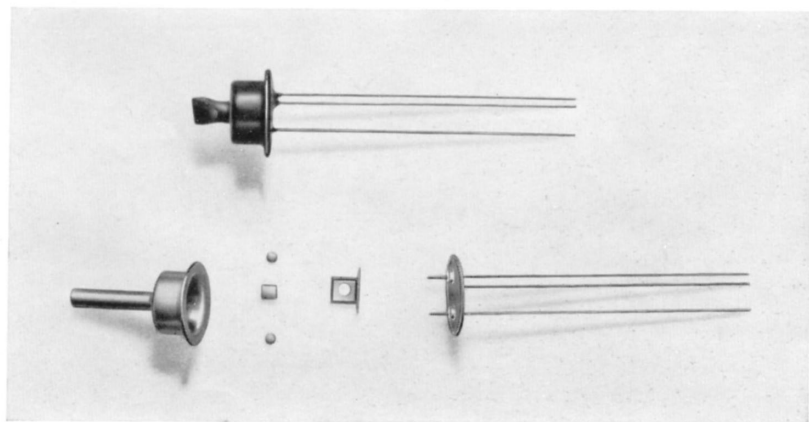
Il processo si arresta quando i diodi pervengono nella zona raffreddante del forno. Qui l'indio risolidifica e la temperatura continua a scendere, mentre il nastro porta i complessi verso l'uscita.

Lo scambio di calore è regolato in modo tale, che quando cessa l'azione protettiva del gas inerte, la temperatura dei diodi non superi i 70 °C.

L'operazione successiva consiste nell'applicazione del reoforo all'indio. Questo reoforo è formato generalmente da un filo di rame nichelato e sagomato in maniera particolare. La parte che deve venir fatta aderire all'indio è appiattita e presenta la forma di una paletta. Questa forma ha (tra gli altri) lo scopo di consentire un buon contatto ohmico fra indio e reoforo. L'operazione si svolge nel modo seguente: il complesso diffuso viene sistemato su di una piastra riscaldante, che lo porta ad una temperatura appena superiore a quella di fusione dell'indio.

A questa temperatura la velocità di diffusione è pressochè nulla, e pertanto il diodo non corre il pericolo di alterarsi.

Da un montante, il reoforo, precedentemente sistemato nella sua sede, viene fatto scendere, fintantochè viene a contatto con l'indio fuso e vi aderisce. A questo punto la corrente che riscalda la piastra viene tolta, il complesso si raffredda, l'indio solidifica, ed il reoforo rimane solidale con esso. Il diodo così ottenuto è completo, costruttivamente, ma non funzionante.

Se infatti si vuol provare la sua efficienza rettificatrice, si vede che questa è scarsissima, spesso addirittura nulla. Il fatto si spiega nel seguente modo: durante il processo di diffusione nel forno, una piccola parte dell'indio evapora e si deposita sulla piastrina di germanio, formando un sottile velo conduttore che ricopre la zona di separazione

Raddrizzatore di potenza al germanio (grandezza naturale).
Sopra: il complesso finito; Sotto: i suoi componenti.

Transistore di potenza al germanio aperto (grandezza naturale).

Transistore p-n-p al germanio (grandezza naturale).
Sopra: il complesso finito; Sotto: i suoi componenti.

indio-germanio. Questo velo di materiale conduttore consente il passaggio della corrente nei due sensi, formando un ponte, in derivazione col diodo (fig. 11-6). Pertanto, anche se la giunzione è assolutamente perfetta, il complesso, sottoposto ad una tensione alternativa, lascia passare la corrente in entrambi i sensi.

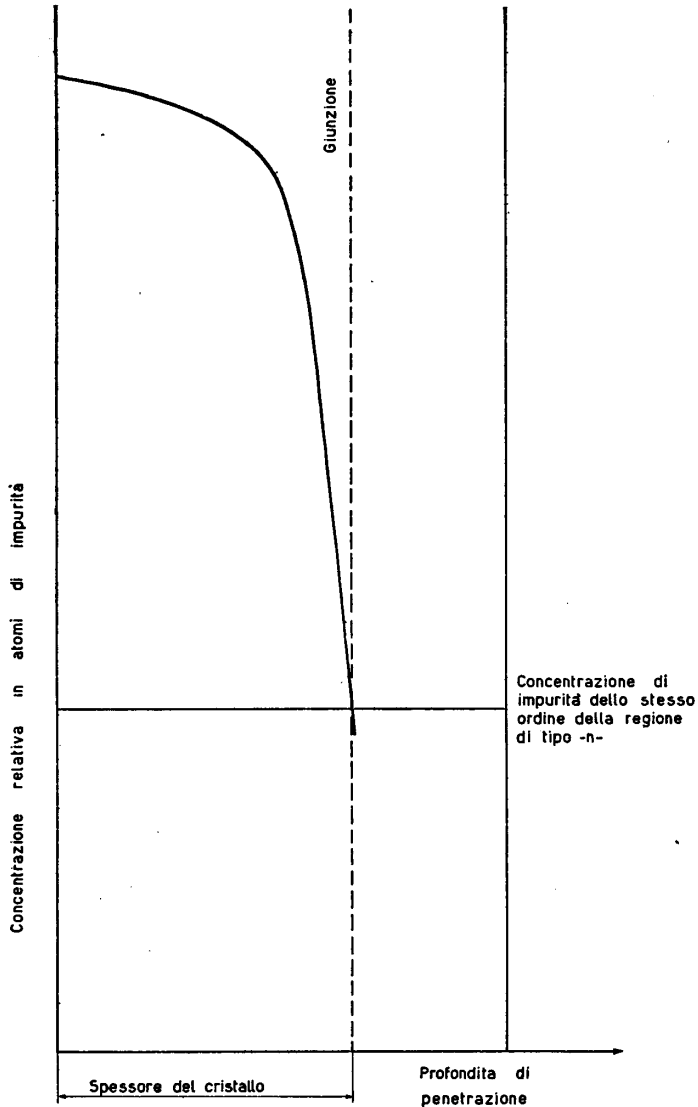



Fig. 11-5 – Diagramma rappresentativo della concentrazione relativa dell'indio, in funzione dello spessore del cristallo.

Precisamente accade che, nel semiperiodo in cui la polarizzazione è applicata in senso diretto, il diodo oppone una minima resistenza al passaggio della corrente, la quale si ripartisce fra le due vie in parallelo che ha a sua disposizione e precisamente il diodo stesso ed il velo di indio, mentre nel semiperiodo in cui la polarizzazione è applicata in senso inverso, il diodo rettifica, ma tutta la corrente passa attraverso il velo di indio. Si ha praticamente un cortocircuito fra i due terminali del complesso.

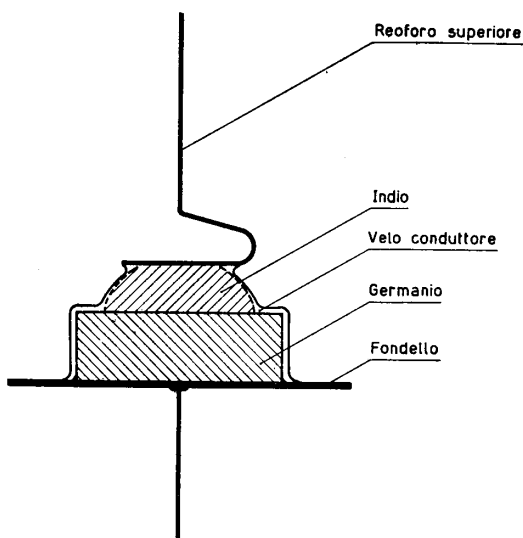



Fig. 11-6 – Diodo a giunzione dopo la diffusione. Indio e germanio sono cortocircuitati dal velo d'indio che ricopre completamente la zona di separazione fra i due elementi.

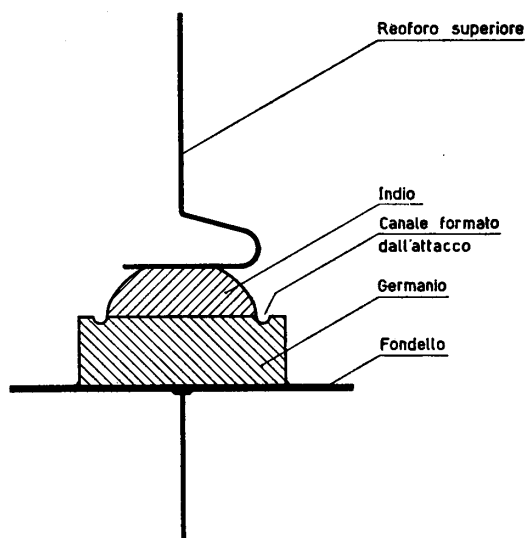



Fig. 11-7 – Diodo a giunzione dopo l'attacco. Il velo d'indio non esiste più e si è formato un canale intorno alla pastiglia di germanio.

Per asportare questo velo di indio ed eliminare di conseguenza il cortocircuito si ricorre ad un attacco elettrolitico.

Durante il passaggio di corrente gli ioni negativi dell'elettrolita dissociato si combinano col germanio, dando luogo ad un composto, che precipita con liberazione di idrogeno. L'attacco determina una specie di canale tutto attorno alla pastiglia di germanio, distruggendo il cortocircuito (fig. 11-7).

La concentrazione dell'elettrolita, la corrente ed il tempo di attacco hanno un'influenza enorme sulla buona riuscita dell'operazione.

Subito dopo l'attacco si rende necessario un lavaggio accuratissimo dei complessi con acqua deionizzata, per asportare fin l'ultima traccia di elettrolita.

Basta infatti che quantità anche minime di sostanza rimangano depositate sul complesso, perchè si venga a creare un ponte fra indio e germanio, che risultano così cortocircuitati.

Gli effetti di questo eventuale cortocircuito si riscontrano al collaudo statico che viene eseguito prima di proseguire nella lavorazione. Dopo il lavaggio, i complessi vengono fatti asciugare completamente in una stufa, alla temperatura di una sessantina di gradi centigradi e quindi, senza portarli in contatto con l'aria ambiente, la cui umidità condenserebbe subito, vengono sottoposti ad una tensione continua inversa ben determinata per ogni tipo di raddrizzatori, controllandone la corrente di perdita.

Ogni tipo ha i suoi limiti massimi di corrente inversa ammissibile, e quegli elementi che la superano possono venire agevolmente ricuperati, facendo ripetere loro il ciclo di lavaggio ed essiccamento.

In una produzione ben funzionante però, tali inconvenienti non dovrebbero accadere quasi mai, perchè un lavaggio poco efficace non può dipendere che dalla trascuratezza, da parte del personale, di osservare le rigorose prescrizioni di pulizia e le precauzioni necessarie nel maneggiamento di questo genere di complessi.

L'ultima operazione critica che subisce un diodo al germanio è la chiusura.

Il cappuccio metallico, munito di tubetto passante isolato, che viene infilato sul complesso, deve venir saldato a tenuta sul fondello. Questa saldatura può venir eseguita in due modi diversi: o mediante stagnatura di un anellino di stagno, facendo uso di una bobina riscaldante percorsa da radio frequenza, oppure mediante saldatura elettrica.

Ci sono varie precauzioni da osservare in entrambi i casi. Anzitutto la saldatura deve risultare perfettamente omogenea ed esente da porosità o discontinuità anche capillari. Si deve prestare la massima attenzione a non danneggiare il diodo per eccessivo riscaldamento, quindi la potenza ed il tempo di saldatura devono venir scelti tenendo presenti tutte queste necessità. Nel caso di impiego della bobina a radio frequenza, deve venir usato un generatore a frequenza sufficientemente alta, per evitare che la corrente indotta circoli troppo in profondità, riscaldando eccessivamente il complesso, mentre nel caso di impiego della saldatrice elettrica, la pressione esercitata dall'elettrodo deve essere quanto più possibile uniforme, allo scopo di non creare delle resistenze di contatto fra cappuccio e fondello, localizzate in una zona,

che in tal caso rimarrebbe fredda, mentre il resto dell'area saldata si surriscalderebbe in seguito al passaggio di corrente con una densità eccessiva.

Una volta compiuta la chiusura, i complessi devono venir essiccati perfettamente, riempiti di gas inerte, e quindi chiusi in modo definitivo. Subiscono ancora un ciclo di prove di umidificazione, allo scopo di determinare con sicurezza se la tenuta stagna è stata o meno raggiunta, dopo di che passano al collaudo.

Il circuito di collaudo è illustrato nel capitolo XIV.

Naturalmente ogni fabbrica che produce diodi di potenza su scala industriale, fa uso di apparecchiature automatiche di collaudo che selezionano i vari tipi di una serie.

Non si deve credere, infatti, che ogni tipo di diodo venga progettato con determinati criteri per ottenere un prodotto ben definito.

I criteri di progettazione riguardano solamente la corrente raddrizzata e la tensione massima di sbarramento, variabili da tipo a tipo, ma ogni serie di diodi è la conseguenza degli inevitabili sottoprodotti che escono dalla complessa lavorazione. Come si vede nelle tabelle in appendice, ciascuna serie è formata da più tipi diversi, di cui solo uno è il risultato previsto in sede di progetto, e gli altri sono i sottoprodotti, che in percentuali variabili da caso a caso, si ottengono sempre durante una lavorazione, per quanto accurata essa sia. Prendiamo ad esempio la seguente serie 1 N 90. È composta di 3 tipi: 1 N 93, 1 N 92, 1 N 91.

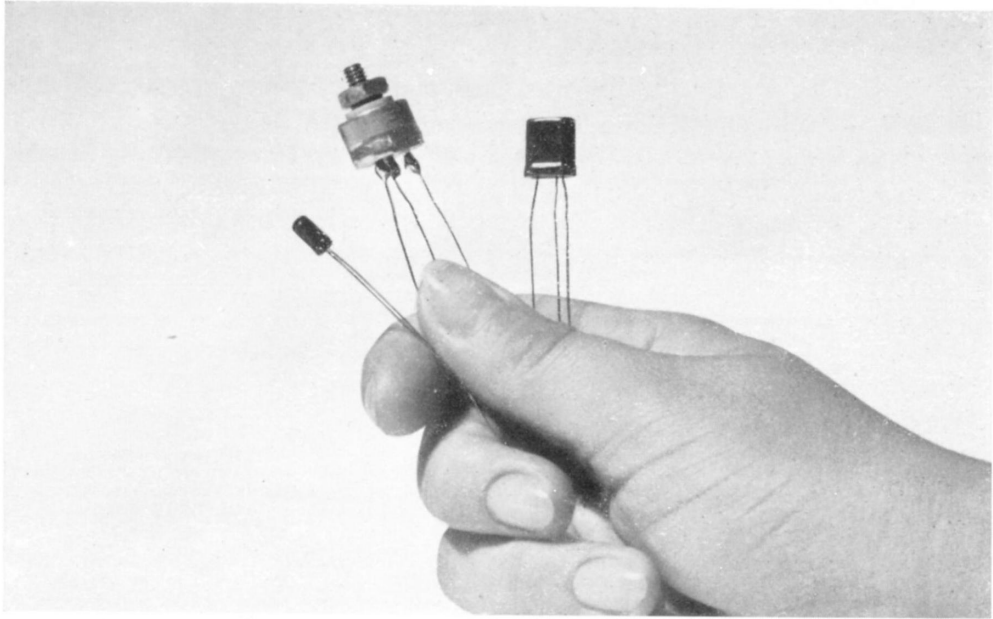
Il primo di questi, l'1 N 93 è un diodo praticamente esente da ogni difetto, e rispecchia quindi i risultati dal progettista, che, nel caso in esame, consistono in una tensione inversa di picco di 300 V ed in una corrente raddrizzata media di 75 mA.

L'1 N 92 è un diodo costruito nell'identico modo, ma che per qualche ragione [1] non riesce a sopportare una tensione inversa di picco di 300 V, mentre ne sopporta benissimo una di 200 V, e pertanto la sua corrente diretta media può venir aumentata da 75 a 100 mA.

L'1 N 91 infine, riesce a sopportare solo una tensione di sbarramento di 100 V, e quindi può raddrizzare una corrente di 150 mA.

Questi limiti di corrente raddrizzata sono fissati tenendo conto essenzialmente della potenza totale dissipata, e dei particolari fenomeni che si verificano nella giunzione al variare della polarizzazione impressa.

---

[1] Fare un'analisi completa di quali possano essere queste ragioni, richiederebbe una disgressione troppo ampia per i limiti che ci si è proposti di fissare a questo volume.

Tre tipi caratteristici di transistori. Da sinistra a destra: tipo subminiatura per bassa frequenza; tipo di potenza; tipo per radio frequenza.

Banco di collaudo universale per transistori (vedi pag. 150).

11-4. Montaggio dei transistori a giunzione per diffusione, tipo *p-n-p*.

Le piastrine usate per il montaggio dei transistori a giunzione per diffusione variano di dimensioni e di forma, a seconda dei tipi, ma la tecnologia è sempre la stessa, ed ha molti punti in comune con quella per la formazione delle giunzioni nei diodi.

Costruttivamente un transistore a giunzione si presenta come in figura 11-8, che ne rappresenta una sezione trasversale. È essenzialmente

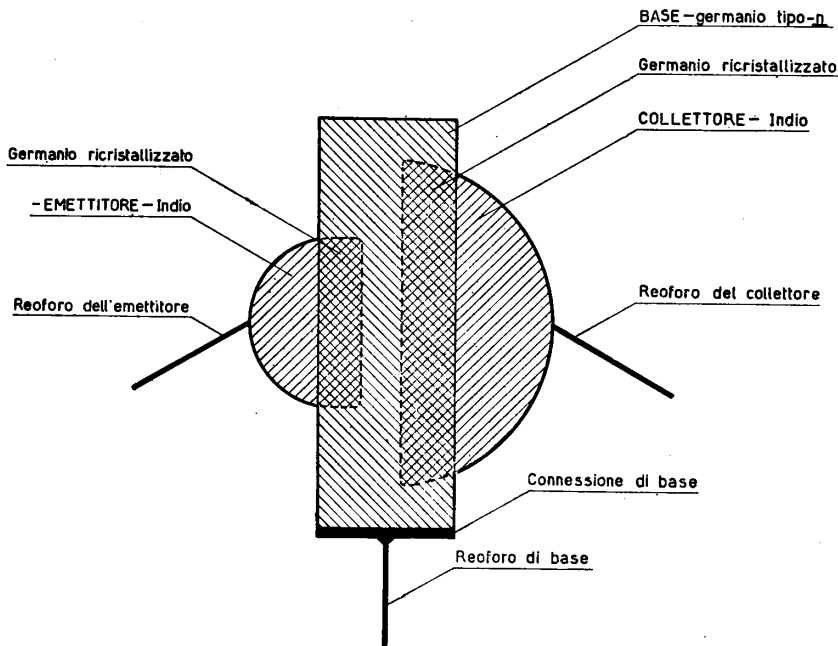



Fig. 11-8 – Schema di un transistore a giunzione *p-n-p*.

formato da una piastrina di germanio tipo *n*, con gli assi cristallografici opportunamente orientati, che ne costituisce la base, e di due dischetti di indio, di dimensioni diverse, che formano, la più piccola l'emettitore, la più grande il collettore.

Emettitore, base e collettore sono collegati a 3 reofori, che vanno ai terminali della custodia del transistore (non indicata in figura).

Le piastrine di germanio sono per lo più di forma rettangolare. Le loro dimensioni superficiali dipendono dalla potenza dissipata al collettore, mentre il loro spessore è minimo, dell'ordine di alcuni centesimi di millimetro.

Come si è visto nella prima parte, i motivi che obbligano a far uso di piastrine molto sottili, dipendono esclusivamente da considerazioni riguardanti il tempo di transito dei portatori di carica, i quali, dovendo muoversi attraverso un corpo solido, hanno una velocità relativamente bassa, e quindi impiegano un certo tempo per passare dall'emettitore al collettore, attraverso lo strato di base. Ne consegue una risposta in frequenza tanto migliore, quanto più è sottile la piastrina di germanio tipo *n*, che costituisce la base del transistore.

Però si è già visto come sia molto difficile, nel taglio di un lingotto di germanio, riuscire a ricavare piastrine di spessore inferiore al millimetro. Per ridurle ulteriormente si fa uso di macchine lappatrici speciali, che consentono di ottenere piastrine di spessore inferiore al decimo di millimetro. La lappatura del germanio è un'operazione molto delicata, a causa dell'estrema fragilità del materiale, più che della sua durezza.

Scendere a spessori ancora minori del decimo di millimetro significa aumentare a dismisura lo scarto per rotture.

Lo spessore voluto si ottiene mediante attacco chimico. All'attacco fa seguito un lavaggio accuratissimo, ed un essiccamento perfetto. Successivamente ogni piastrina viene appoggiata con uno dei lati minori su di un nastro stagnato; su una delle due facce viene fatto aderire il dischetto di indio per la formazione dell'emettitore e sulla faccia opposta quello per la formazione del collettore. Queste operazioni avvengono di solito automaticamente. Quindi tutto l'assieme viene fatto passare in un forno ad atmosfera inerte, del tipo descritto per la diffusione dei diodi a giunzione.

I due dischetti di indio diffondono, dando luogo alla formazione delle due giunzioni, e la piastrina di germanio si stagna al nastro. Generalmente le operazioni vengono eseguite una alla volta, cioè si crea prima una diffusione, per esempio quella del collettore, poi l'altra, e quindi la stagnatura della piastrina al nastro.

La forma della giunzione, che per i diodi non ha eccessiva importanza, è invece essenziale per i transistori, specialmente se si desidera ottenere dei tipi funzionanti a frequenze elevate. Eseguendo la fusione dell'indio e la diffusione nel germanio contemporaneamente, la superficie della giunzione risulta curva.

Ora, in un transistore a giunzione per diffusione, le giunzioni sono due, affacciate una all'altra, e si comprende quindi quanto sia importante riuscire ad ottenere due superfici perfettamente piane e parallele, in modo che lo spessore effettivo della base sia costante per tutti i punti. Tale scopo non viene raggiunto con i metodi impiegati per la

diffusione dei diodi di potenza, ma sono necessari degli accorgimenti speciali.

Nel processo normale, l'indio fonde dapprima in un punto, dal quale inizia subito a diffondersi nel germanio, mentre contemporaneamente la fusione e la successiva diffusione si estendono a tutto il dischetto.

In conseguenza alla simultaneità dei due processi di fusione e di diffusione, si ottiene una giunzione a superficie curva.

Per ottenere invece una superficie piana, è necessario suddividere il procedimento di formazione delle giunzioni in tre fasi distinte e precisamente:

1) Fusione del materiale inquinante.
2) Diffusione nel semiconduttore.
3) Ricristallizzazione della lega formatasi.

Ognuna di queste tre fasi deve venir controllata molto accuratamente, per l'ottenimento di un buon risultato.

La fusione del materiale inquinante deve venir compiuta in un forno ad atmosfera inerte, ad una temperatura relativamente bassa, comunque non superiore a $300 \div 350$ °C. I dischetti di materiale vengono attaccati per qualche minuto in una debole soluzione di HCl, lavati con acqua deionizzata, risciacquati con metanolo, ed asciugati. Quindi, dopo essere stati immersi in un opportuno decappante non metallico, vengono sovrapposti alle piastrine di semiconduttore, ed introdotti nel forno per circa tre minuti. Al termine del processo, i dischetti risultano perfettamente saldati alla piastrina, e subiscono ancora un leggero attacco con una soluzione di HCl diluito, seguito da lavaggio in acqua deionizzata.

Per valutare la perfezione della saldatura si possono impiegare due metodi. Il primo metodo fa uso di un trattamento con acido cloridrico, che non attacca il germanio, ma solamente il materiale inquinante. La struttura superficiale della zona saldata così esposta, viene quindi esaminata al microscopio per mettere in evidenza eventuali punti in cui la saldatura non abbia avuto luogo.

L'interpretazione di quanto si osserva al microscopio è però piuttosto difficile, per cui spesso si preferisce ricorrere al secondo metodo, il quale consente di rivelare molto facilmente qualunque discontinuità della saldatura.

Per effettuare questa prova si fa uso di una piastrina di germanio, la cui superficie da saldare è inclinata di una decina di gradi, rispetto al piano (111) del cristallo. Effettuata la fusione, la superficie del germanio inquinato ricristallizzata presenta l'orientamento secondo il

piano (111), e quindi fra i piani delle superfici non saldate e di quelle ricristallizzate si ha un angolo di dieci gradi. In tal modo, facendo uso di una illuminazione verticale per l'osservazione, ed orientando la superficie in modo tale che la luce da questa riflessa entri nell'obiettivo di un microscopio, tutte le zone non saldate appaiono luminose, e vengono di conseguenza rivelate con molta facilità.

L'operazione di diffusione fa penetrare il materiale inquinante nella piastrina di germanio. Si preferisce in generale far sì che il processo avvenga in condizioni di equilibrio, affinchè la profondità di penetrazione sia indipendente dal tempo di diffusione. Questo scopo si raggiunge con l'aiuto dei diagrammi di stato, e tenendo presente che la profondità di penetrazione è determinata dalla temperatura, dal volume del materiale inquinante e dalla superficie di saldatura. Il processo di diffusione dell'indio nel germanio è un processo di dissolvimento del cristallo. L'entità della penetrazione varia a seconda dei piani cristallografici, per cui l'orientamento del cristallo assume una grande importanza. Il piano (111) è quello che presenta la maggior densità di atomi, ed agisce pertanto come un mezzo naturale di livellamento per la lega fusa. Se si lavora in condizioni prossime a quelle di equilibrio, l'azione dei piani cristallografici è sentita ancor maggiormente. La temperatura deve pertanto venir fatta salire gradualmente, in ragione di non più di 20 °C al minuto.

La ricristallizzazione della lega deve anche avvenire in condizioni di equilibrio, e perciò anche il raffreddamento non deve essere brusco, ma deve avvenire gradatamente, facendo discendere la temperatura di circa 20 °C al minuto. In tal modo la lega germanio-indio solidifica ancora sotto forma monocristallina e viene evitata la formazione di geminature e di cristallini di germanio nell'indio.

Ottenuti i complessi diffusi, vengono applicati i reofori all'emettitore ed al collettore, con diversi sistemi, che variano moltissimo da un costruttore all'altro, e si procede alla saldatura elettrica dei reofori ai terminali passanti del fondello.

Per gli stessi motivi già visti nella lavorazione dei diodi a giunzione, anche in questo caso si rende necessario un attacco elettrolitico ed il successivo lavaggio ed essiccamento. Eseguita la chiusura o col metodo della stagnatura mediante bobina a radio frequenza o con quello di saldatura elettrica, si passa al riempimento con gas inerte ed alla chiusura definitiva. Anche i transistori subiscono uno o più cicli per determinarne la resistenza all'umidità e la tenuta.

Il collaudo è un'operazione piuttosto complessa, se paragonato a quello dei diodi.

Esistono ora delle apparecchiature universali che consentono di effettuare il rilevamento di tutti i parametri di maggior interesse, senza dover spostare il transistore da un circuito all'altro. Una di queste apparecchiature è descritta nel capitolo XIV.

11-5. Transistori a giunzione per accrescimento, tipo *n-p-n*.

La tecnica di costruzione di questi transistori si differenzia moltissimo da quella impiegata per i transistori a giunzione per diffusione. Il loro funzionamento è invece del tutto analogo, eccezion fatta per quanto riguarda il segno delle tensioni di polarizzazione applicate.

Nel campo della risposta in frequenza, i transistori a giunzione per accrescimento, tipo *n-p-n*, raggiungono, in normale produzione, limiti non accessibili agli esemplari dell'altro tipo.

Sono comuni frequenze di taglio di alcuni megacicli al secondo ed alcuni tipi particolari, attualmente ancora allo studio, sembra possano funzionare addirittura nel campo delle microonde.

Il sistema che viene usato per la costruzione di questo tipo di transistori, consiste nel tiraggio, mediante seme, anzichè di un lingotto monocristallino opportunamente drogato, e con le impurità distribuite nel modo più uniforme possibile, come si è visto nel capitolo IX, di un lingotto, sempre monocristallino, ma avente una successione di giunzioni *p-n*.

Un primo metodo impiegato per ottenere questo risultato è il seguente. Facendo uso di un forno di tiraggio normale, si inizia il processo partendo da germanio purissimo, non drogato.

La velocità di crescita è bassissima, da 2 a 3 centimetri all'ora. Quando si sono formati alcuni millimetri di lingotto, si introduce nella massa fusa una piccola quantità di un'impurità, per esempio donatrice. Lasciato passare un tempo sufficiente per permettere all'impurità aggiunta di mescolarsi e distribuirsi completamente nella massa fusa, viene introdotta un'altra piccola quantità di impurità, di segno opposto alla precedente (nel nostro esempio ricettatrice). Naturalmente la seconda impurità deve venir aggiunta in quantità sufficiente per neutralizzare l'effetto dei portatori di carica di segno opposto dovuti alla prima impurità e per dare alla massa fusa la caratteristica elettrica voluta (nel nostro caso formare germanio tipo *p*).

L'aggiunta successiva di impurità, sempre di tipo opposto al precedente, quindi nel caso in esame, donatrice, deve venir fatta tenendo sempre conto della necessità di neutralizzare i portatori di carica già esistenti e di fornire al germanio fuso i portatori di segno opposto. Proseguendo di questo passo, il germanio viene inquinato in maniera ec-

cessiva, per cui si riescono ad ottenere non più di una o due giunzioni *p-n* di alta qualità, in un lingotto. Tutto il resto del materiale, impregnato di impurità, deve successivamente venir ritrattato prima di poterlo utilizzare di nuovo. Inoltre il dosaggio esatto delle impurità da aggiungere e la bassissima velocità di trazione del lingotto, rendono la lavorazione quanto mai costosa e lenta.

Un altro principio, molto più usato, e completamente diverso dal precedente, porta a dei risultati addirittura sbalorditivi.

Con un solo lingotto si riescono infatti ad ottenere fino a 2000 transistori *n-p-n*, e quel che più conta, perfettamente uguali fra loro in tutte le caratteristiche.

In un solo lingotto si riesce, con questo metodo, a produrre fino a 100 giunzioni *p-n* di elevata qualità. Inoltre la velocità di crescita è molto maggiore e la « coda », cioè quella parte di germanio che rimane nel crogiolo, una volta finito il tiraggio, può venire usata nuovamente, senza bisogno di venir ripurificata.

Prima di passare alla descrizione della lavorazione con questo sistema, sono necessari alcuni schiarimenti di natura teorica.

Quando un lingotto viene « tirato » dalla massa fusa, composta di germanio puro, cui sono state aggiunte tracce di elementi del III e del V gruppo, i donatori ed i ricettatori vengono assimilati dal lingotto crescente in una proporzione che è funzione della velocità di crescita del cristallo. In altre parole, la quantità percentuale di impurità che viene assimilata dal cristallo in via di formazione, differisce, in generale, da quella presente nella massa fusa, varia al variare della velocità di crescita del cristallo, ed ha valori diversi per ogni tipo di impurità.

Ora, per una determinata velocità di crescita del cristallo, il rapporto fra il contenuto di impurità assimilate da un lingotto crescente, ed il contenuto di impurità presenti nel germanio liquido, da cui viene tirato il lingotto, è una costante. A questa costante si dà il nome di « costante di segregazione ». Variando la velocità di crescita del cristallo, varia la costante di segregazione, però il grado di variazione di questa costante, per un dato intervallo di variazione della velocità di crescita, differisce notevolmente da impurità a impurità.

Su tale proprietà si basa il sistema di tiraggio, che sfrutta appunto la variazione della costante di segregazione in funzione della velocità di crescita del cristallo. Il forno usato in pratica è un normale forno di tiraggio, per quanto riguarda le parti meccaniche, mentre è munito di uno speciale regolatore di temperatura, che consente di variare a scatti la potenza riscaldante del forno, secondo una successione predeterminata.

La miscela fusa, da cui viene tirato il lingotto, consiste nel semi-

conduttore allo stato purissimo, in una traccia di elemento donatore ed in una traccia di elemento ricettatore.

Le tracce delle due impurità vengono aggiunte in proporzioni tali da introdurre nel semiconduttore effetti elettrici di tipo opposto, ed uguali in valore assoluto, in modo che, alla velocità di crescita prefissata, diano luogo ad un semiconduttore intrinseco. Questa velocità di crescita, per cui si origina nel tiraggio un semiconduttore intrinseco, prende il nome di « velocità di crescita intrinseca ».

Se dalla miscela fusa viene tirato un cristallo, alla velocità di crescita intrinseca, il germanio che solidifica è intrinseco, cioè nè di tipo n nè di tipo p. Supponiamo ora di aumentare la velocità di crescita. Le costanti di segregazione delle due impurità presenti nella massa fusa subiscono allora una variazione, per esempio supponiamo che l'elemento donatore aumenti la sua costante, mentre l'elemento ricettatore la diminuisca. Nel cristallo che cresce in queste condizioni si ha quindi una prevalenza dei donatori sui ricettatori, cioè il germanio risulta di tipo n. Cosa analoga, ma con effetti opposti, avviene se la velocità di crescita viene portata ad un valore inferiore a quello di crescita intrinseca.

In questo caso aumenta la costante di segregazione dell'elemento ricettatore e diminuisce quella dell'elemento donatore, in modo che nel cristallo in formazione si ha una prevalenza di ricettatori sui donatori, e il germanio risulta di tipo p. È da notare che non è indispensabile che le variazioni della costante di segregazione delle due impurità aggiunte abbiano sempre segno opposto. È sufficiente infatti che mentre, per una data variazione della velocità di crescita, una costante aumenta, l'altra rimanga invariata, e per lo meno aumenti in misura inferiore alla prima.

Le variazioni della velocità di crescita del cristallo si ottengono mediante variazioni della potenza riscaldante fornita al crogiolo contenente la massa fusa.

Queste variazioni di potenza si traducono in variazioni del gradiente termico fra fase liquida e fase solida, gradiente dal quale appunto dipende la velocità di crescita.

Regolando opportunamente il ciclo di riscaldamento, si viene a rifondere una parte del lingotto già cresciuto, in modo che si riesce a formare strati estremamente sottili di materiale semiconduttore di un dato tipo (p) intervallati da regioni più ampie di tipo opposto (n).

Si possono così formare dei lingotti aventi fino a 100 e più giunzioni, le quali si presentano disposte come in figura 11-9.

La velocità di trazione verticale del seme corrisponde alla velocità media di crescita, e si aggira sui 10 centimetri all'ora.

Per regolare la velocità media di crescita da usare, è necessario tracciare le curve caratteristiche della costante di segregazione in funzione della velocità di crescita, relative alle varie impurità, allo scopo di scegliere le impurità più adatte.

Il metodo usato per il calcolo della costante di segregazione, partendo da misure di resistività, è piuttosto complesso e lungo, e non verrà esposto in questa sede.

Il lingotto formato ha una forma caratteristica, con delle zone alternativamente più o meno larghe. Per ottenere i transistori, il lingotto viene squadrato e le giunzioni vengono individuate o cospargendo le

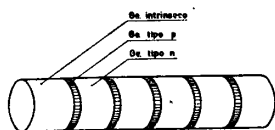



Fig. 11-9 – Lingotto a giunzioni multiple per transistori *n-p-n*.

facce del lingotto con una polvere finissima di un composto speciale, e facendo percorrere il lingotto da una debole corrente alternata, oppure eseguendo un leggero attacco elettrolitico con una base forte.

Nel primo caso, le particelle del composto si depositano sulle giunzioni, nel secondo caso, l'attacco asporta una parte del germanio di un tipo, lasciando inalterato l'altro.

Il taglio si eseguisce nella mezzaria delle zone di tipo *n*, le più estese, ottenendo così tante fette, contenenti ciascuna due giunzioni. Successivamente, mediante taglio in croce, si ottengono i transistori *n-p-n*.

I reofori dell'emettitore e del collettore vengono saldati alle estremità di tipo *n*, mediante contatto ohmico, mentre il reoforo di base viene applicato facendo uso di un elemento ricettatore, per esempio indio, il quale, venendo in contatto con lo strato di tipo *p*, non altera il comportamento del complesso.

Con tale sistema si sono ottenuti transistori con frequenza di taglio di alcune decine di megacicli al secondo.

CAPITOLO XII

MONTAGGIO DA LABORATORIO DI COMPLESSI SPECIALI

Accenniamo brevemente agli ultimissimi tipi di transistori, attualmente ancora in fase sperimentale, e di cui si hanno pertanto scarse notizie, ma le cui premesse sono tali da dare adito a molte speranze sul loro prossimo sviluppo su scala industriale.

12-1. Tetrodi.

Presso i laboratori della Bell Telephone è stata recentemente costruita un'apparecchiatura, che è stata battezzata « Mr. Meticulous », e che compie, in meno di un minuto, una quindicina di delicatissime operazioni su di una barretta di germanio dello spessore di un capello umano e della lunghezza di una capocchia di fiammifero. La barretta è costituita da tre strati di germanio, n, p, n, e l'apparecchiatura salda due reofori sullo strato centrale, che forma la base del transistore, il quale per questo motivo prende il nome di tetrodo o transistore a 4 terminali. Si suppone che il tetrodo transistore che ne risulta avrà importanti applicazioni nei sistemi ad alta frequenza e di trasmissione a larga banda.

Il principio del suo funzionamento è stato esposto nel cap. VII.

Le operazioni di costruzione si susseguono nel seguente modo. Un operatore sistema la minuscola barretta di germanio in un apposito supporto e la macchina quindi preme un sottilissimo filo d'oro, con la punta sagomata a scalpello, contro la barretta e la fa scorrere lungo un lato con piccolissimi scatti di $\frac{1}{20\,000}$ di pollice. Dopo ogni scatto l'apparecchiatura controlla elettricamente se è stato raggiunto il sottilissimo strato centrale di germanio tipo p (dello spessore di $\frac{1}{10\,000}$ di pollice)

al quale deve venir saldato il filo. Non appena il filo tocca questo strato, la macchina ne misura la larghezza, fino a che ne raggiunge l'altra estremità. A questo punto decide se la barretta è accettabile o meno; se non lo è, la espelle automaticamente. Se invece la barretta è soddisfacente, la macchina ritorna sui suoi passi fino alla parte opposta dello strato centrale e conta quindi in avanti un predeterminato numero di passi. A questo punto viene fornito un impulso di corrente per attaccare il filo al germanio. La macchina salda poi questo filo ad uno dei 4 terminali della base del transistore. Quindi capovolge la barretta di germanio e ripete la stessa serie di operazioni dal lato opposto.

Da ultimo la macchina esegue una serie di controlli elettrici per determinare se il transistore completo presenta le caratteristiche desiderate.

Se il complesso non supera l'esame, viene automaticamente espulso, se invece lo supera, Mr. Meticulous lo mette da parte e ricomincia il suo lavoro con una nuova barretta di materiale.

Tutto ciò in meno di un minuto e con scrupolosa esattezza. Da ciò si può comprendere la ragione del nomignolo affibbiato a questa macchina.

12-2. Transistori ad effetto di campo.

Nella prima parte del volume è esposta la teoria del transistore ad effetto di campo.

Ci limitiamo qui a dare un cenno sulla sua costruzione pratica. La piastrina di germanio monocristallino impiegata, contiene una giunzione n-n^+, cioè una giunzione che separa una zona costituita da germanio di tipo n avente una data concentrazione di impurità, da una zona costituita sempre da germanio di tipo n, ma avente una concentrazione di impurità maggiore.

Ciò si fa allo scopo di evitare che il raccoglitore, a contatto con la zona n^+, possa iniettare portatori minoritari (in questo caso lacune) nel semiconduttore.

Il germanio usato ha una resistività di circa 20 ohm-cm, valore conveniente per non avere nè effetti di resistenza negativa, nè eccessiva tensione di chiusura.

Su un attrezzo apposito viene montata verticalmente la piastrina di germanio. In un piano ad essa perpendicolare si dispone una aletta metallica munita di finestrella, che ha il doppio scopo di servire come supporto per l'indio, e come elemento raffreddante.

La piastrina di germanio attraversa centralmente questa finestrella,

che viene colmata con due pezzetti di indio, disposti da entrambi i lati della piastrina di germanio, nel piano della aletta metallica. Sopra la aletta viene quindi sistemato un sottile spaziatore e su di esso viene posta la sorgente, costituita da una lega a base di stagno, con un punto di fusione molto prossimo a quello dell'indio. Lo spaziatore serve appunto ad impedire che, durante la fusione, lo stagno della sorgente venga a contatto con l'indio dei battenti.

I contatti della sorgente e dei battenti vengono ottenuti simultaneamente mediante fusione dello stagno e dell'indio in apposito forno con atmosfera controllata.

12-3. Transistori a giunzione per sublimazione.

Uno dei punti deboli dei transistori a giunzione è lo spessore della regione di base, che limita la frequenza di lavoro.

Mediante speciali accorgimenti si riesce oggi a controllare molto da vicino la diffusione degli elementi inquinanti nel germanio. Si sono ottenuti strati superficiali di profondità inferiore al micron.

Adottando questa tecnica, presso i laboratori della Bell Telephone sono stati costruiti dei transistori con frequenze di taglio superiori a 500 mc/sec. La tecnica della diffusione offre anche il vantaggio di produrre un gradiente di impurità nella regione di base del transistore, gradiente che dà origine ad un campo elettrico interno, fisso, di verso tale da facilitare lo spostamento dei portatori minoritari dall'emettitore al collettore. Questo campo elettrico acceleratore può migliorare alquanto la risposta in frequenza di un transistore a parità di dimensioni. La lavorazione è però piuttosto complessa e ci limitiamo quindi ad un breve cenno.

Il materiale usato per la fabbricazione di transistori *p-n-p* con questo metodo è costituito da germanio di tipo *p* con una bassa resistività. Dal lingotto vengono ricavate piccole barrette rettangolari, le quali subiscono una lappatura che le porta alle dimensioni di $0{,}5 \times 0{,}15 \times 0{,}04$ mm circa.

Successivamente queste barrette vengono leggermente attaccate e lavate con molta cura in acqua deionizzata. Quando sono asciutte vengono poste nel forno a vuoto per la diffusione delle impurità di tipo *n* sulla loro superficie.

Il forno a vuoto consiste di una piccola capsula di molibdeno, riscaldata per irraggiamento da una bobina di tungsteno.

La capsula viene portata ad una temperatura di 1900 °C per far evaporare eventuali impurità, nocive alle caratteristiche elettriche del

germanio. Quindi nel forno vengono introdotte le barrette di germanio di tipo *p* e la lega inquinante di tipo *n*.

Come elemento donatore viene impiegato l'arsenico, che si introduce sotto forma di lega germanio-arsenico. L'uso della lega anzichè dell'elemento puro è giustificato dai seguenti motivi. Anzitutto la tensione di vapore della lega è molto inferiore a quella dell'arsenico puro, inoltre la quantità dell'elemento donatore può venir controllata molto bene, semplicemente misurando la resistività della lega, ed infine l'uso del germanio come componente, elimina ogni problema di contaminazione nociva.

Riscaldando sotto vuoto la capsula, ad una temperatura opportuna, si verifica un'evaporazione di atomi di arsenico dalla lega, i quali vanno a depositarsi sulle barrette di germanio *p*, diffondendovisi superficialmente.

Si ottengono così (per diffusione) degli strati superficiali in cui il germanio è diventato di tipo *n*, e di cui bisogna misurare la conduttività e lo spessore. La conduttività superficiale viene misurata col sistema delle 4 punte, isolando elettricamente lo strato in esame dal corpo del futuro transistore.

Per ottenere questo isolamento si asporta, mediante attacco acido, una piccola zona dello strato superficiale (tipo *n*), mettendo a nudo il Ge tipo *p* sottostante, e si polarizzano in senso inverso le due zone della giunzione.

Lo spessore viene misurato smussando uno spigolo della barretta mediante lappatura, con un angolo piccolissimo ($\frac{1}{2}^\circ \div 1^\circ$) rispetto alla superficie originaria, e localizzando la giunzione.

Poi, rilevando la tangente dell'angolo fra le due superfici e la distanza fra spigolo e giunzione, si ottiene facilmente la misura dello spessore.

I contatti ohmici per l'emettitore e per la base vengono ottenuti usando le tecniche di evaporazione sotto vuoto e di formazione delle leghe.

Per l'emettitore, costituito dal corpo di germanio tipo *p*, messo in parte precedentemente a nudo con la lappatura, viene depositata, per evaporazione, una pellicola di alluminio, dello spessore di circa 1000 Å e delle dimensioni di alcuni millesimi di millimetro, quindi la barretta viene riscaldata in atmosfera di idrogeno alla temperatura di formazione della lega germanio-alluminio.

Lo stesso procedimento viene ripetuto per la base, evaporando sotto vuoto una lega oro-antimonio, dello spessore di 3000$\div$4000 Å, che forma una pellicola delle stesse dimensioni della precedente, vici-

nissima all'emettitore e riscaldando nuovamente il complesso in atmosfera di idrogeno alla temperatura di formazione dell'eutectico oro-germanio.

Successivamente ogni barretta viene saldata su di una lastrina di platino, facendo uso di indio, il quale, diffondendo nello strato superficiale di tipo n, viene a formare la regione del collettore di tipo p. Resta ancora da eseguire un attacco acido sulla saldatura indio-germanio tipo n, per asportare eventuali pellicole conduttrici, depositatesi durante la saldatura, che potrebbero cortocircuitare collettore e base, e da collegare i reofori alle superfici dell'emettitore e della base. Questi reofori sono costituiti da fili di bronzo fosforoso appuntiti elettroliticamente, del diametro di 2,5 millesimi di millimetro.

Come si vede, si tratta di una lavorazione molto complessa e difficile, che richiede un gran numero di operazioni, per ciascuna delle quali devono venir prese particolari precauzioni, allo scopo di evitare il danneggiamento del complesso, di dimensioni eccezionalmente piccole anche per un transistore. Ogni trattamento, sia chimico che di evaporazione sotto vuoto, comporta la copertura con cera protettiva delle parti che devono rimanere invariate. È però da tener presente che si tratta ancora di una lavorazione da laboratorio in fase sperimentale, che senza dubbio potrà in futuro venir notevolmente semplificata. I risultati ottenuti finora dànno molte speranze per l'avvenire di questo tipo di lavorazione, che, facendo uso di una tecnica del tutto nuova, nel campo dei semiconduttori, consente di superare l'inconveniente forse più grave dei transistori, quello della risposta in frequenza.

PARTE TERZA

APPLICAZIONI

CAPITOLO XIII

CIRCUITI EQUIVALENTI DEL TRANSISTORE

13-1. Il transistore come quadripolo attivo - Connessione con base a massa.

In perfetta analogia con quanto si usa fare per i tubi a vuoto, anche per i transistori risulta molto conveniente e semplificativo l'impiego dei circuiti equivalenti.

Tali circuiti equivalenti sono in grado di descrivere le proprietà del transistore con piccoli segnali applicati, e facendo l'ipotesi che il punto di funzionamento non esca dal campo in cui i parametri resistivi sono lineari e costanti in valore.

Se invece, come accade in realtà, i parametri variano con le condizioni di lavoro, come ad esempio le polarizzazioni o la temperatura, le formule sviluppate sulla base delle ipotesi fatte possono venir modificate ed interpretate tenendo conto delle variazioni avvenute; in ogni caso però — per un punto di funzionamento, un campo di frequenze, ed una temperatura ben determinati — il circuito equivalente rappresenta sempre la realtà delle cose.

Supponendo nota al lettore la teoria dei quadripoli, iniziamo considerando il transistore come un quadripolo attivo e supponiamo di

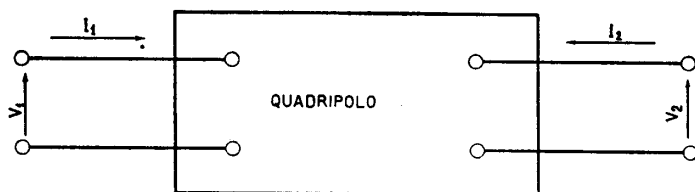



Fig. 13-1 – Quadripolo.

fissare come positivi i versi indicati in figura 13-1 per le correnti e per le tensioni, sia in entrata che in uscita.

Assumiamo come variabili indipendenti I_1 ed I_2, e come funzioni V_1 e V_2. Possiamo allora scrivere le equazioni seguenti:

(13-11) $$V_1 = f_1(I_1, I_2) \quad ; \quad V_2 = f_2(I_1, I_2)$$

Differenziando si ottiene:

(13-12) $$\begin{cases} dV_1 = \dfrac{\partial f_1}{\partial I_1} dI_1 + \dfrac{\partial f_1}{\partial I_2} dI_2 \\ dV_2 = \dfrac{\partial f_2}{\partial I_1} dI_1 + \dfrac{\partial f_2}{\partial I_2} dI_2 \end{cases}$$

Ponendo, per semplicità:

(13-13) $$\begin{cases} dV_1 = v_1 \\ dV_2 = v_2 \\ dI_1 = i_1 \\ dI_2 = i_2 \end{cases}$$

si ha:

(13-14) $$\begin{cases} v_1 = \dfrac{\partial f_1}{\partial I_1} i_1 + \dfrac{\partial f_1}{\partial I_2} i_2 \\ v_2 = \dfrac{\partial f_2}{\partial I_1} i_1 + \dfrac{\partial f_2}{\partial I_2} i_2 \end{cases}$$

Poniamo ora:

(13-15) $$\begin{cases} \dfrac{\partial f_1}{\partial I_1} = r_{11} \\ \dfrac{\partial f_1}{\partial I_2} = r_{12} \\ \dfrac{\partial f_2}{\partial I_1} = r_{21} \\ \dfrac{\partial f_2}{\partial I_2} = r_{22} \end{cases}$$

e sostituiamo nell'equazione (13-14).

Si ottiene:

$$\text{(13-16)} \qquad \begin{cases} v_1 = r_{11}\, i_1 + r_{12}\, i_2 \\ v_2 = r_{21}\, i_1 + r_{22}\, i_2 \end{cases}$$

Da questa espressione risulta subito evidente il significato delle quantità r_{11}, r_{12}, r_{21} ed r_{22}. Supponiamo infatti di far funzionare il quadripolo a circuito d'uscita aperto; in tal caso ovviamente $i_2 = 0$, e le equazioni (13-16) si riducono a:

$$\text{(13-17)} \quad \begin{cases} v_1 = r_{11}\, i_1 \\ v_2 = r_{21}\, i_1 \end{cases} \quad \text{da cui:} \quad \text{(13-18)} \quad \begin{cases} r_{11} = \dfrac{v_1}{i_1} \\ r_{21} = \dfrac{v_2}{i_1} \end{cases}$$

Analogamente, col quadripolo a circuito d'entrata aperto, poichè in tal caso $i_1 = 0$, si ha:

$$\text{(13-19)} \quad \begin{cases} v_1 = r_{12}\, i_2 \\ v_2 = r_{22}\, i_2 \end{cases} \quad \text{da cui:} \quad \text{(13-110)} \quad \begin{cases} r_{12} = \dfrac{v_1}{i_2} \\ r_{22} = \dfrac{v_2}{i_2} \end{cases}$$

Si può quindi in definitiva affermare che le quantità r_i rappresentano semplicemente delle resistenze [1] a circuito aperto ed il circuito equivalente più semplice, che rispecchia la situazione determinata dall'equazione (13-16) è quello a π di figura 13-2.

Lo si può verificare immediatamente, applicando i principi di Kirchhoff alle due maglie elementari di cui è costituito il circuito equivalente.

L'altro circuito equivalente classico, più utile nel caso specifico, in quanto corrisponde in un certo senso alla struttura reale del transi-

---

[1] Va osservata una cosa: in realtà i rapporti $\dfrac{v_i}{i_i} = r_i$ rappresentano non resistenze ohmiche, ma bensì impedenze.

La semplificazione adottata, considerando r_i come resistenze pure, è un'ipotesi lecita solamente supponendo che le componenti reattive delle impedenze siano trascurabili rispetto alle componenti resistive, il che in pratica è verificato per molti casi.

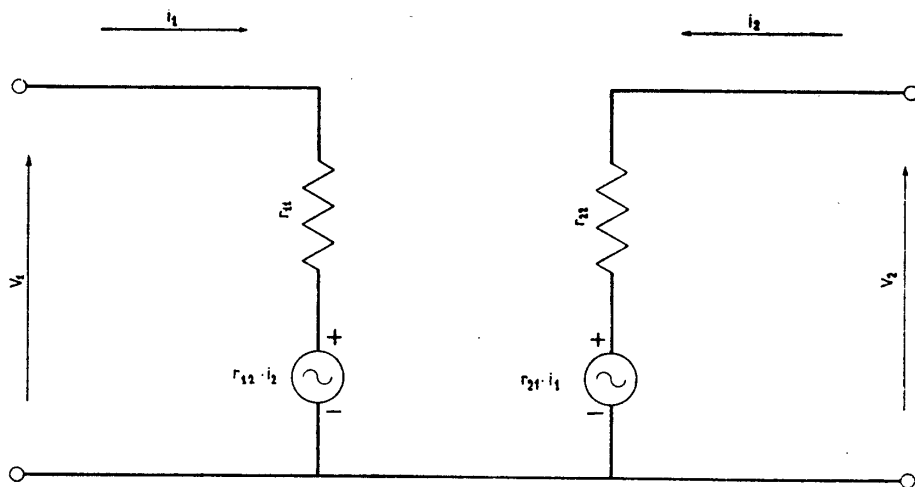



Fig. 13-2 – Circuito equivalente a π.

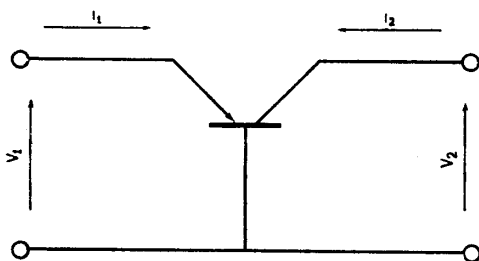
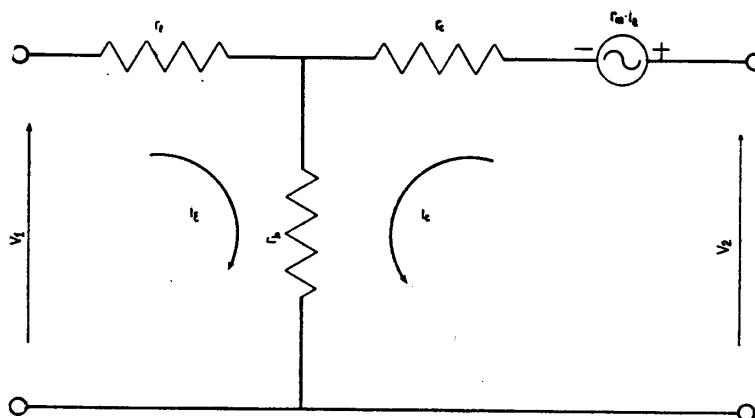



Fig. 13-3 – Circuito equivalente a T.

store [1], è quello a T, di figura 13-3, il quale contiene anche un generatore di tensione equivalente, $r_m i_\varepsilon$.

r_m prende il nome di resistenza mutua per il quadripolo. I parametri r_ε, r_b ed r_c vengono indicati rispettivamente col nome di resistenza di emettitore, resistenza di base e resistenza di collettore.

Scrivendo le equazioni di Kirchhoff per le due maglie del circuito, si ottengono le seguenti espressioni:

$$(13\text{-}111) \qquad \begin{cases} v_1 = r_\varepsilon i_\varepsilon + r_b i_\varepsilon + r_b i_c = (r_\varepsilon + r_b) i_\varepsilon + r_b i_c \\ v_2 = r_b i_\varepsilon + r_b i_c + r_c i_c + r_m i_\varepsilon = (r_b + r_m) i_\varepsilon + (r_b + r_c) i_c \end{cases}$$

in cui sono raggruppati i coefficienti delle correnti di emettitore (i_ε) e di collettore (i_c).

Scriviamo ora nuovamente le equazioni (13-16) relative al circuito equivalente a π e riportiamo le equazioni (13-111) ricavate per il circuito equivalente a T, tenendo presente che in questo caso, $i_1 = i_\varepsilon$ ed $i_2 = i_c$

$$(13\text{-}16) \qquad \begin{cases} v_1 = r_{11} i_1 + r_{12} i_2 \\ v_2 = r_{21} i_1 + r_{22} i_2 \end{cases}$$

$$(13\text{-}111) \qquad \begin{cases} v_1 = (r_\varepsilon + r_b) i_\varepsilon + r_b i_c \\ v_2 = (r_b + r_m) i_\varepsilon + (r_b + r_c) i_c \end{cases}$$

Dal confronto di queste equazioni, risulta subito che:

$$(13\text{-}112) \qquad \begin{cases} r_{11} = r_\varepsilon + r_b \\ r_{12} = r_b \\ r_{21} = r_b + r_m \\ r_{22} = r_b + r_c \end{cases}$$

dalle quali si ricavano immediatamente le:

$$(13\text{-}113) \qquad \begin{cases} r_\varepsilon = r_{11} - r_{12} \\ r_b = r_{12} \\ r_c = r_{22} - r_{12} \\ r_m = r_{21} - r_{12} \end{cases}$$

---

[1] Come si vede dalla figura 13-3, nel circuito equivalente a *T*, esiste realmente una corrispondenza fisica fra i rami del circuito e gli elementi del transistore. Il punto comune ai circuiti d'entrata e d'uscita è in questo caso la base e per questo motivo la connessione del transistore prende il nome di « connessione con base a massa ».

Sono però possibili altre due connessioni, e precisamente la « connessione con emettitore a massa », in cui l'elettrodo comune è l'emettitore, e la « connessione con collettore a massa », in cui l'elettrodo comune è il collettore. Questi altri due casi verranno trattati in seguito (paragrafi 13-3 e 13-4).

Le equazioni (13-112) e (13-113) forniscono i valori delle resistenze per i due circuiti equivalenti, le une in funzione delle altre. Il circuito a T ora ricavato è del tipo a sorgente di tensione costante. Per passare al circuito equivalente a T del tipo a sorgente di corrente costante, dimostriamo innanzitutto che i due circuiti seguenti (fig. 13-4) si equivalgono perfettamente.

Entrambi contengono la resistenza r_c; il primo è fornito di una sorgente di tensione $r_m\, i_\varepsilon$, mentre il secondo è fornito di una sorgente di corrente $a\, i_\varepsilon$.

La dimostrazione si può fare, supponendo vera l'equivalenza dei due circuiti, e verificando se tale ipotesi porta a dei risultati concordi.

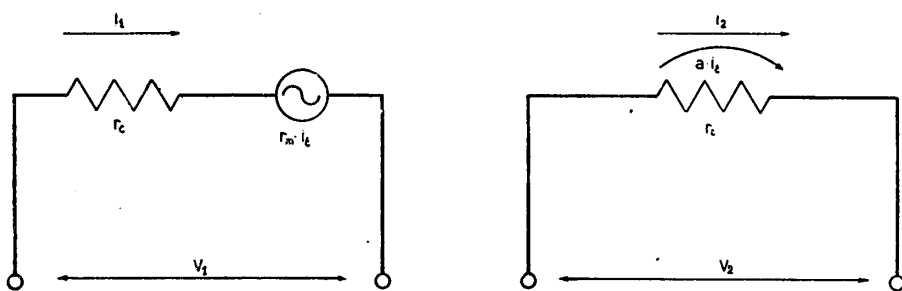



Fig. 13-4 – Circuiti equivalenti a sorgente di tensione costante ed a sorgente di corrente costante per la connessione con base a massa.

Consideriamo prima il caso di funzionamento a circuito aperto. Se i circuiti si equivalgono, la tensione v_1 ai capi del primo deve essere uguale alla tensione v_2 ai capi dell'altro, cioè:

$$v_1 = r_m\, i_\varepsilon = v_2 = r_c\, a\, i_\varepsilon$$

semplificando per i_ε si ricava:

$$a = \frac{r_m}{r_c} \tag{13-114}$$

Consideriamo ora il caso in corto circuito.

Facendo sempre l'ipotesi di equivalenza fra i due circuiti di figura 13-4, la corrente i_1 che circola nel primo, deve essere uguale alla corrente i_2 che circola nel secondo, cioè:

$$i_1 = \frac{r_m\, i_\varepsilon}{r_c} = i_2 = a\, i_\varepsilon$$

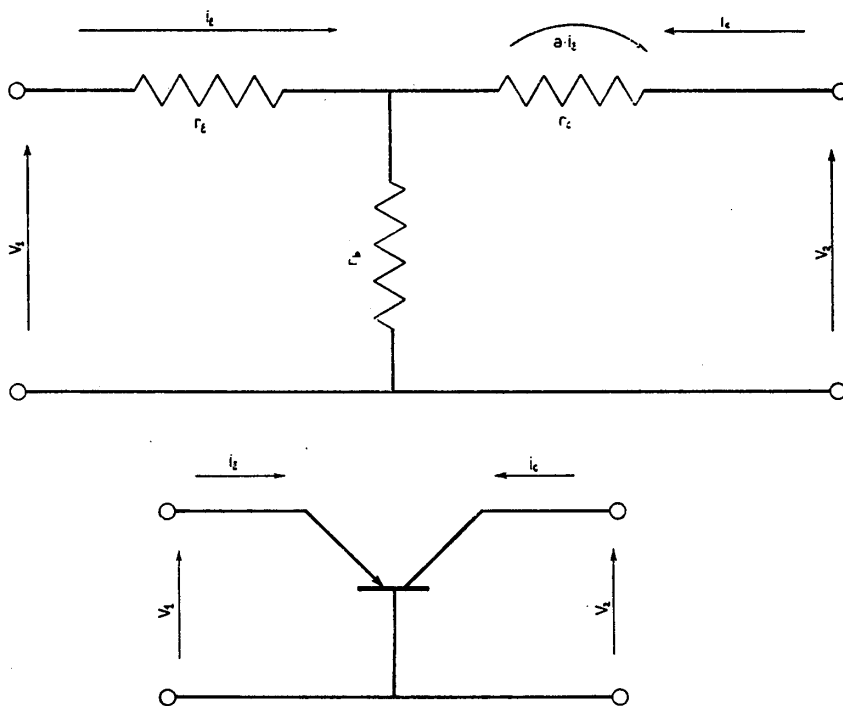



Fig. 13-5 – Circuito equivalente a T, a sorgente di corrente costante.

Semplificando per i_ε si ricava:

$$a = \frac{r_m}{r_c}, \tag{13-114}$$

cioè lo stesso risultato ottenuto in precedenza.

Risulta pertanto lecito sostituire il circuito equivalente a T del tipo a sorgente di tensione costante, con quello del tipo a sorgente di corrente costante, di figura 13-5.

Un coefficiente di grande interesse nei transistori è il coefficiente di amplificazione, cioè il fattore di moltiplicazione della corrente, con i terminali d'uscita in corto circuito per la sola corrente alternata.

Nel caso di connessione con base a massa, cioè in quella connessione finora presa in esame, in cui l'elettrodo comune è la base, questo coefficiente, che viene indicato col simbolo α, è dato dal rapporto fra una piccola variazione della corrente del collettore ΔI_c, dovuta ad una piccola variazione della corrente dell'emettitore ΔI_ε, e questa stessa ΔI_ε, per un valore costante della tensione del collettore V_c.

In simboli:

$$\alpha = \left| \frac{\partial I_c}{\partial I_\varepsilon} \right| V_c = \text{cost.}$$

Il valore di α in funzione dei parametri r_i del transistore si può ricavare come segue: ragionando sul circuito equivalente nella connessione con base a massa (fig. 13-6), e supponendo di avere cortocircuitato i terminali d'uscita per la componente alternata della corrente del col-

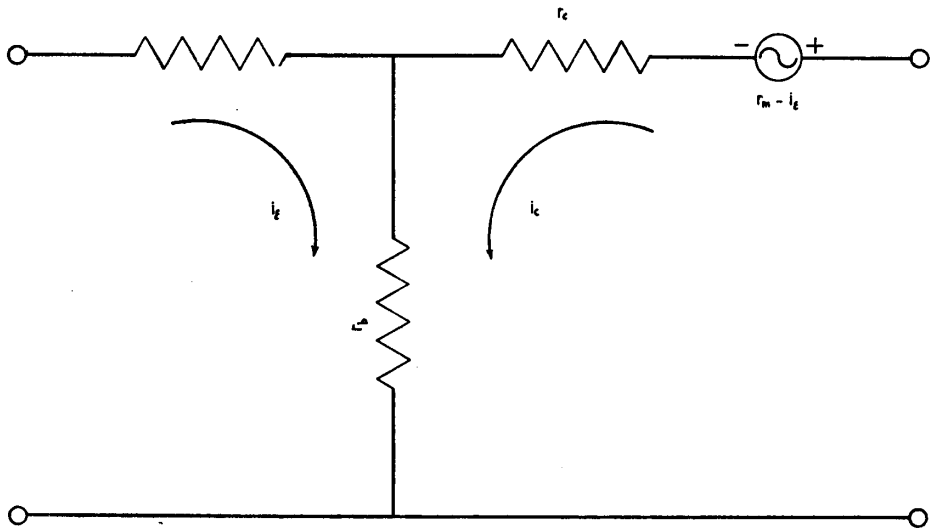



Fig. 13-6 – Connessione con base a massa (circuito equivalente).

lettore, basta applicare il teorema di Kirchhoff alla maglia elementare che interessa il circuito d'uscita, per ottenere:

$$v_2 = 0 = r_b\, i_c + r_c\, i_c + r_b\, i_\varepsilon + r_m\, i_\varepsilon\,,$$

da cui:

$$i_c\,(r_c + r_b) + i_\varepsilon\,(r_b + r_m) = 0$$

e infine:

$$\left| \frac{i_c}{i_\varepsilon} \right| = \frac{r_m + r_b}{r_c + r_b} = \alpha = \frac{r_{21}}{r_{22}} \tag{13-115}$$

Il segno di valore assoluto per il rapporto fra le correnti, viene introdotto per non avere un valore negativo di α.

Nei transistori a giunzione, r_b è molto minore sia di r_m che di r_c per cui è lecita l'approssimazione:

$$\alpha = \left| \frac{i_c}{i_\varepsilon} \right| = \frac{r_m + r_b}{r_c + r_b} \simeq \frac{r_m}{r_c} = a \tag{13-116}$$

13-2. Parametri ibridi.

Oltre alla serie di resistenze r_i già ricavate per il transistore funzionante a circuito d'entrata o d'uscita aperti, si può anche ottenere un'altra serie completa di parametri, detti parametri h o parametri ibridi. Questo nome risulta dal fatto che non tutti rappresentano la medesima entità, (come nel caso delle resistenze r_i), ma precisamente, due di essi sono adimensionali, uno rappresenta una resistenza, ed uno una conduttanza.

Come fatto in precedenza, consideriamo il transistore come un quadripolo attivo, e scegliamo due variabili indipendenti e due funzioni.

In questo caso le variabili indipendenti sono però i_1 e v_2 (anzichè i_1 e i_2) e le funzioni v_1 ed i_2 (anzichè v_1 e v_2).

Le equazioni che si ricavano in tal modo, seguendo il procedimento già svolto per i parametri r_i, sono:

$$\begin{cases} v_1 = h_{11}\, i_1 + h_{12}\, v_2 \\ i_2 = h_{21}\, i_1 + h_{22}\, v_2 \end{cases} \tag{13-21}$$

Facendo funzionare il quadripolo con l'uscita cortocircuitata, $v_2 = 0$, e si ricava:

$$\begin{cases} v_1 = h_{11}\, i_1 \\ i_2 = h_{21}\, i_1 \end{cases} \tag{13-22}$$

da cui:

$$\begin{cases} h_{11} = \dfrac{v_1}{i_1} \\[2ex] h_{21} = \dfrac{i_2}{i_1} \end{cases} \tag{13-23}$$

Analogamente, col quadripolo a circuito d'entrata aperto, si ha $i_1 = 0$, e quindi:

$$\begin{cases} v_1 = h_{12}\, v_2 \\ i_2 = h_{22}\, v_2 \end{cases} \tag{13-24}$$

da cui:

$$\begin{cases} h_{12} = \dfrac{v_1}{v_2} \\[2ex] h_{22} = \dfrac{i_2}{v_2} \end{cases} \tag{13-25}$$

Da queste espressioni si desume facilmente il significato dei parametri h.

h_{11} infatti rappresenta la resistenza di ingresso con l'uscita cortocircuitata.

h_{12} è semplicemente il rapporto fra le tensioni di ingresso e d'uscita, a circuito d'entrata aperto, ed è pertanto un numero puro.

h_{21} è il rapporto fra le correnti d'uscita e d'entrata, con l'uscita cortocircuitata, ed è ancora un numero puro.

h_{22} rappresenta invece la conduttanza d'uscita a circuito d'entrata aperto.

I vantaggi presentati dai parametri h_i sono dati principalmente dalla relativa facilità di ottenere delle misure precise, cosa che non avviene per tutti i parametri r_i. Inoltre il coefficiente α viene misurato direttamente ($\alpha = -h_{21}$) anzichè risultare dal rapporto di due altri parametri $\left(\frac{r_{21}}{r_{22}} = \alpha\right)$, che può portare ad una maggiore possibilità di errori.

Questi sono i motivi principali che consigliano l'uso dei parametri ibridi nella trattazione e nello studio dei transistori.

Per comodità, vengono di seguito riportate le formule di conversione fra parametri resistivi e parametri ibridi, e viceversa:

$$
\left\{
\begin{aligned}
r_\varepsilon &= h_{11} - \left(\frac{h_{12}}{h_{22}}\right)(1 + h_{21}) \\
r_b &= \frac{h_{12}}{h_{22}} \\
r_c &= \frac{1 - h_{12}}{h_{22}} \simeq \frac{1}{h_{22}} \\
a &= -\frac{h_{21} - h_{12}}{1 - h_{12}} \simeq -h_{21} \\
r_m &= a\, r_c
\end{aligned}
\right.
\tag{13-26}
$$

$$
(13\text{-}27)\quad \begin{cases}
h_{11} = \dfrac{r_\varepsilon r_b + r_c [r_\varepsilon + r_b (1 - a)]}{r_b + r_c} \simeq r_\varepsilon + r_b (1 - a) \\[2ex]
h_{12} = \dfrac{r_b}{r_b + r_c} \simeq \dfrac{r_b}{r_c} \\[2ex]
h_{21} = - \left(\dfrac{r_b + a\, r_c}{r_b + r_c} \right) = - \alpha \simeq - a \\[2ex]
h_{22} = \dfrac{1}{r_b + r_c} \simeq \dfrac{1}{r_c}
\end{cases}
$$

13-3. Connessione con emettitore a massa.

Come già accennato, ogni transistore può venir connesso in un circuito in 3 modi diversi, e precisamente con base a massa, con emettitore a massa e con collettore a massa, a seconda dell'elettrodo che risulta comune ai due circuiti di entrata e di uscita.

Il caso finora trattato è quello più semplice, di connessione con base a massa, però tutto il procedimento seguito per questo, si può senz'altro riportare agli altri due casi, con alcune piccole modifiche ed accorgimenti.

Il circuito equivalente per la connessione con emettitore a massa è quello di figura 13-7 (del tipo a sorgente di tensione costante).

Rispetto al circuito precedentemente studiato, con base a massa, si osservano alcune diversità, e precisamente, si vede che il generatore di tensione è ora determinato dal valore della corrente di base i_b, anzichè da quello della corrente di emettitore i_ε; inoltre la resistenza interna del collettore è ora data da $r_c\,(1 - a)$, valore che risulta uguale ad $(r_c - r_m)$, tenendo conto che $a = \dfrac{r_m}{r_c}$.

$$
(13\text{-}31)\qquad r_c (1 - a) = r_c \left(1 - \frac{r_m}{r_c} \right) = r_c - r_m
$$

Scrivendo ora le equazioni per le due maglie che compongono il circuito, si ottiene:

$$
(13\text{-}32)\quad \begin{cases}
v_1 = r_b i_b + r_\varepsilon i_b + r_\varepsilon i_c = (r_b + r_\varepsilon) i_b + r_\varepsilon i_c \\
v_2 = r_\varepsilon i_b + r_\varepsilon i_c + r_c (1 - a) i_c - r_m i_b = \\
\quad = (r_\varepsilon - r_m) i_b + [r_c (1 - a) + r_\varepsilon] i_c
\end{cases}
$$

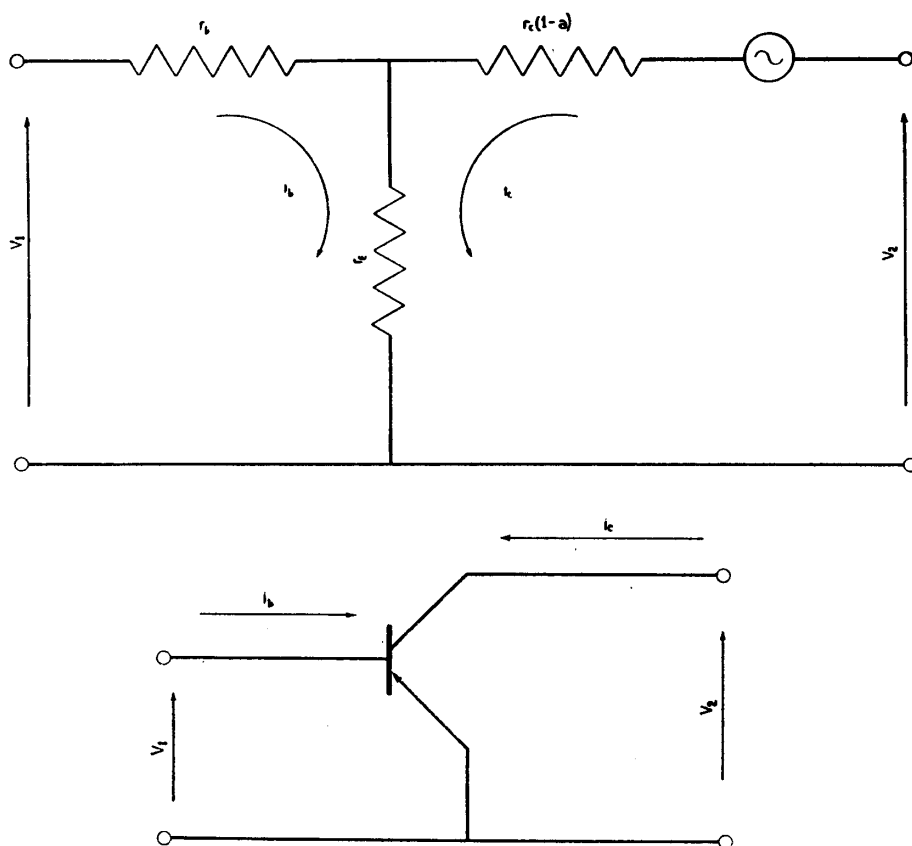



Fig. 13-7 – Connessione con emettitore a massa e circuito equivalente a sorgente di tensione costante.

Sostituendo ora il generatore di tensione della figura precedente col generatore di corrente equivalente, si ottiene il circuito equivalente del tipo a sorgente di corrente costante, di figura 13-8.

Anche in questo caso si può adottare lo stesso procedimento seguito per dimostrare l'equivalenza dei due tipi di circuiti nella connessione con base a massa.

Riportiamo in figura 13-9 i due elementi che caratterizzano i due circuiti.

Supponiamo verificata l'equivalenza dei due circuiti, e sviluppiamo le formule che ne risultano, considerando prima il caso a circuito aperto, e quindi il caso in corto circuito.

Per il funzionamento a circuito aperto si ha:

$$v_1 = r_m\, i_b = v_2 = r_c\,(1 - a)\, b\, i_b$$

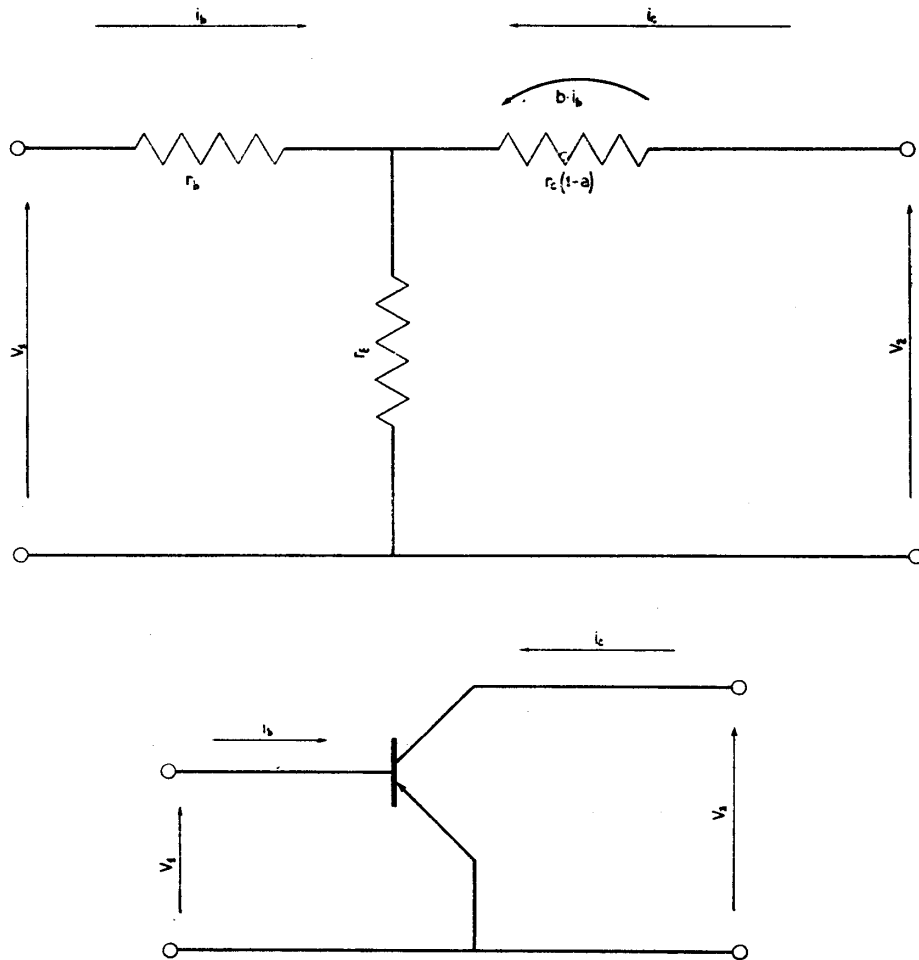



Fig. 13-8 – Connessione con emettitore a massa e circuito equivalente a sorgente di corrente costante.

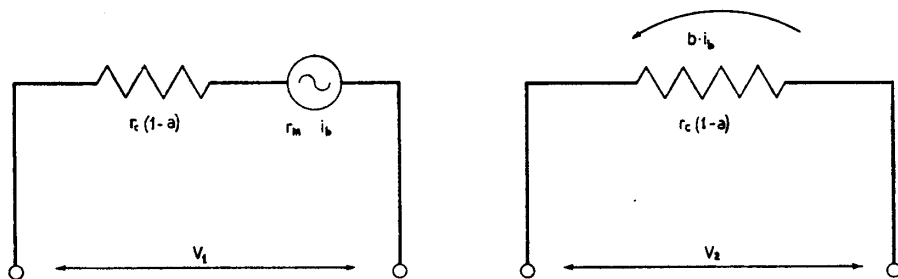



Fig. 13-9 – Circuiti equivalenti a sorgente di tensione costante ed a sorgente di corrente costante per la connessione con emettitore a massa.

da cui:

(13-33) $$b = \frac{r_m}{r_c\,(1 - a)} = \frac{r_m}{r_c - r_m}$$

Per il funzionamento in corto circuito, si ha:

$$i_1 = \frac{r_m\, i_b}{r_c\,(1 - a)} = i_2 = b\, i_b$$

da cui:

(13-33) $$b = \frac{r_m}{r_c\,(1 - a)} = \frac{r_m}{r_c - r_m}$$

Ora siccome $a = \dfrac{r_m}{r_c}$, segue che $r_m = a\, r_c$, e sostituendo nella (13-33) si ottiene:

(13-34) $$b = \frac{r_m}{r_c - r_m} = \frac{a\, r_c}{r_c - a\, r_c} = \frac{a}{1 - a}$$

In molti casi di interesse pratico, questo circuito equivalente indica molto bene la relazione esistente fra le correnti di entrata e di uscita, indica cioè che un generatore di corrente di b volte la grandezza della corrente d'entrata, opera nel circuito d'uscita.

Anche i parametri ibridi si possono ricavare nello stesso modo usato per il caso della connessione con base a massa.

Le relazioni che legano fra loro i parametri ibridi nella connessione con emettitore a massa (indicati con un apice) e quelli nella connessione con base a massa, sono riportati qui di seguito:

(13-35) $$\left\{\begin{aligned} h_{11}' &\simeq \frac{h_{11}}{1 + h_{21}} \\ h_{12}' &\simeq \frac{h_{11}\, h_{22} - h_{12}\, h_{21} - h_{12}}{1 + h_{21}} \\ h_{21}' &\simeq \frac{- h_{21}}{1 + h_{21}} \\ h_{22}' &\simeq \frac{h_{22}}{1 + h_{21}} \end{aligned}\right.$$

Il segno di approssimazione indica una precisione dell'1%.

13-4. Connessione con collettore a massa.

Per il caso di connessione con collettore a massa è più conveniente ricavare i circuiti equivalenti, sia del tipo a sorgente di tensione costante, che del tipo a sorgente di corrente costante, dai circuiti corri-

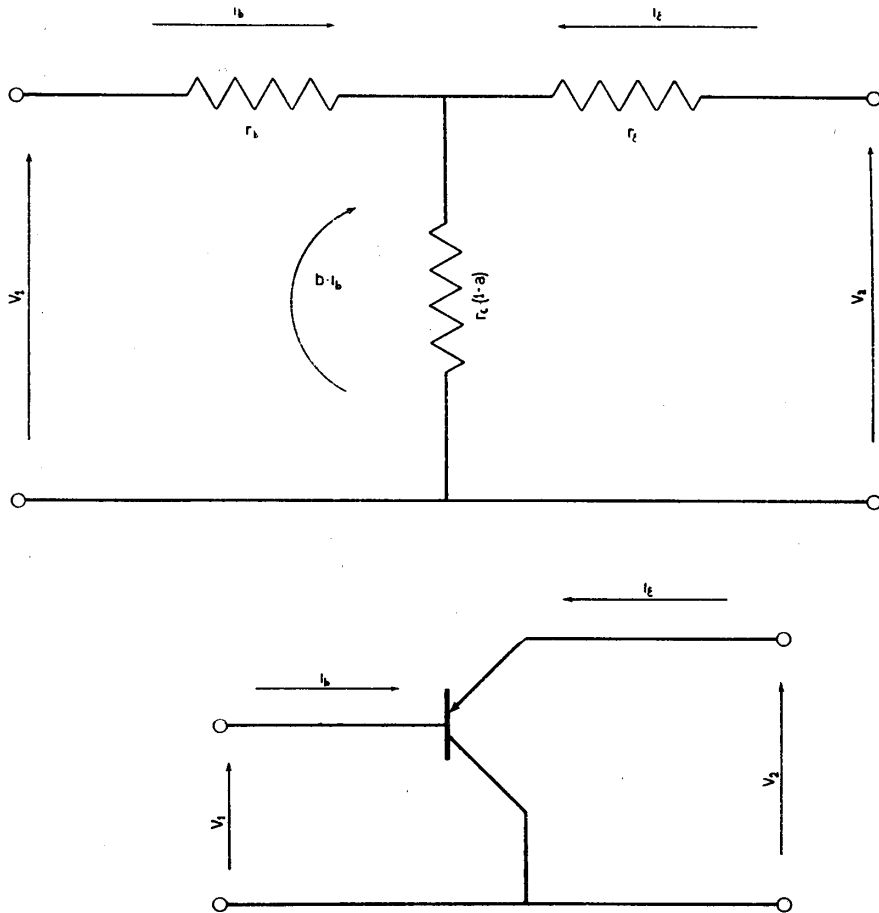



Fig. 13-10 – Connessione con collettore a massa e circuito equivalente a sorgente di tensione costante.

spondenti al caso di connessione con emettitore a massa, facendo uso dei medesimi parametri.

Il circuito equivalente, del tipo a sorgente di tensione costante,

è indicato in figura 13-10 e le equazioni relative sono ovviamente le seguenti:

$$(13\text{-}41)\qquad \begin{cases} v_1 = (r_b + r_c)\, i_b + (r_c - r_m)\, i_\varepsilon \\ v_2 = r_c\, i_b + (r_\varepsilon + r_c - r_m)\, i_\varepsilon \end{cases}$$

Il circuito equivalente, del tipo a sorgente di corrente costante, è indicato in figura 13-11, e si può dimostrare l'effettiva equivalenza dei

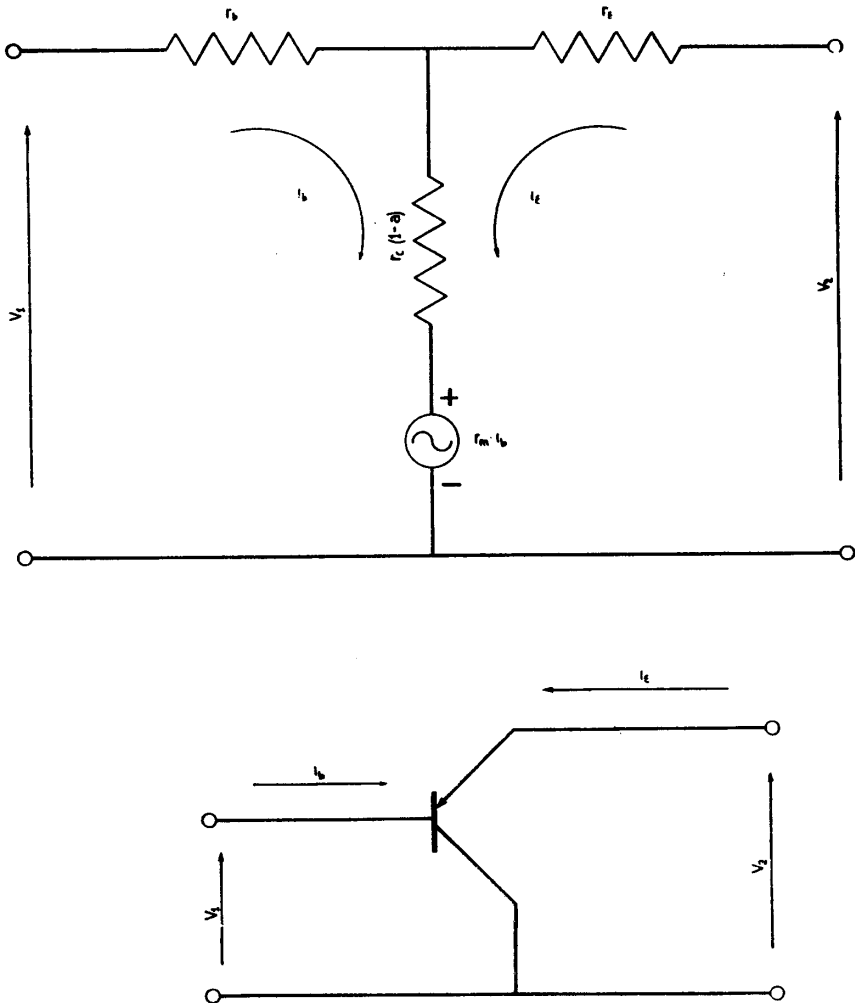



Fig. 13-11 – Connessione con collettore a massa, e circuito equivalente a sorgente di corrente costante.

due tipi, in modo del tutto analogo a quanto già fatto in precedenza per gli altri due casi di connessioni possibili.

I parametri ibridi, indicati con doppio apice, per il caso di connessione con collettore a massa, sono legati a quelli del caso di connessione con base a massa, dalle seguenti relazioni, con l'approssimazione dell'1%:

$$
(13\text{-}42) \qquad \left\{
\begin{aligned}
h_{11}'' &\simeq \frac{h_{11}}{1 + h_{21}} \\
h_{12}'' &\simeq 1 \\
h_{21}'' &\simeq \frac{-1}{1 + h_{21}} \\
h_{22}'' &\simeq \frac{h_{22}}{1 + h_{21}}
\end{aligned}
\right.
$$

Molto ci sarebbe da dire sulla convenienza di usare una determinata connessione piuttosto che un'altra, a seconda dei vari casi, e sui pregi e difetti di ciascuna connessione, ma questo argomento ci porterebbe molto lontano dai limiti imposti al presente volume.

Ci limitiamo a far notare che generalmente la connessione con emettitore a massa è di gran lunga la preferita e maggiormente usata nei normali circuiti a transistori, per vari motivi, primi fra tutti quelli di consentire l'impiego di un'unica batteria di polarizzazione e di dare un guadagno maggiore di quello ottenibile negli altri due casi.

13-5. Curve caratteristiche.

In figura 13-12 sono riportate le quattro famiglie di curve fondamentali per un transistore tipico del tipo a giunzione *p-n-p* che rappresentano le caratteristiche statiche delle tensioni di emettitore (V_ε) e di collettore (V_c), e delle correnti di emettitore (I_ε) e di collettore (I_c), le une in funzione delle altre, secondo le combinazioni seguenti:

$$V_c = f(I_c) \quad ; \quad V_c = f(I_\varepsilon) \quad ; \quad V_\varepsilon = f(I_c) \quad ; \quad V_\varepsilon = f(I_\varepsilon)$$

Trascriviamo le equazioni (13-14), sostituendo alle f_1 ed f_2 generiche, i valori V_ε e V_c.

$$(13\text{-}51) \qquad v_\varepsilon = \frac{\partial V_\varepsilon}{\partial I_\varepsilon} i_\varepsilon + \frac{\partial V_\varepsilon}{\partial I_c} i_c \quad ; \quad v_c = \frac{\partial V_c}{\partial I_\varepsilon} i_\varepsilon + \frac{\partial V_c}{\partial I_c} i_c$$

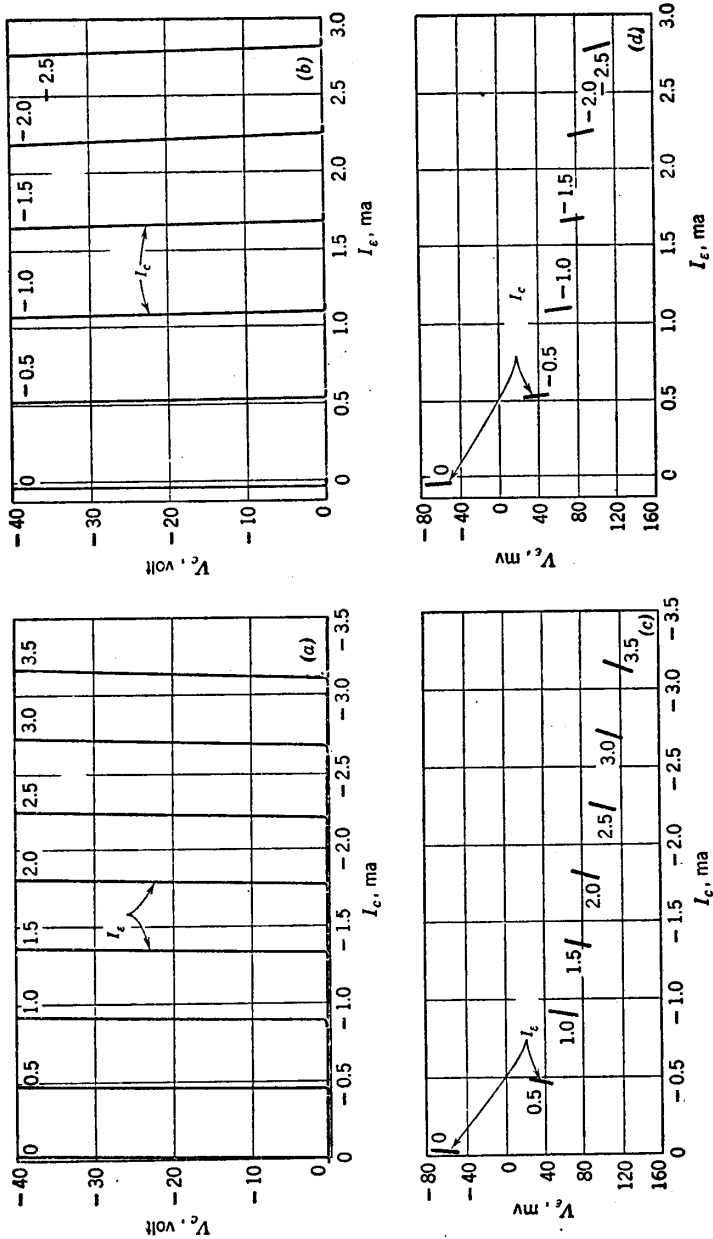



Fig. 13-12 – Famiglie di curve fondamentali per un transistore tipico del tipo a giunzione *p-n-p*.

Si vede che:

$r_{11} = \dfrac{\partial V_\varepsilon}{\partial I_\varepsilon}$ è la pendenza della curva $V_\varepsilon = f(I_\varepsilon)$ per $I_c = \text{cost.}$

$r_{12} = \dfrac{\partial V_\varepsilon}{\partial I_c}$ è la pendenza della curva $V_\varepsilon = f(I_c)$ per $I_\varepsilon = \text{cost.}$

$r_{21} = \dfrac{\partial V_c}{\partial I_\varepsilon}$ è la pendenza della curva $V_c = f(I_\varepsilon)$ per $I_c = \text{cost.}$

$r_{22} = \dfrac{\partial V_c}{\partial I_c}$ è la pendenza della curva $V_c = f(I_c)$ per $I_\varepsilon = \text{cost.}$

Se nelle equazioni (13-51) poniamo $v_c = 0$, il che equivale a supporre V_c costante, queste equazioni diventano:

(13-52) $$v_\varepsilon = r_{11}\, i_\varepsilon + r_{12}\, i_c \quad ; \quad 0 = r_{21}\, i_\varepsilon + r_{22}\, i_c$$

da cui:

(13-53) $$i_\varepsilon = \frac{\begin{vmatrix} v_\varepsilon & r_{12} \\ 0 & r_{22} \end{vmatrix}}{\Delta} \qquad \text{e} \qquad i_c = \frac{\begin{vmatrix} r_{11} & v_\varepsilon \\ r_{21} & 0 \end{vmatrix}}{\Delta}$$

dove Δ è il determinante

(13-54) $$\Delta = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{vmatrix}$$

Il rapporto

$$\frac{i_c}{i_\varepsilon} = \frac{\begin{vmatrix} r_{11} & v_\varepsilon \\ r_{21} & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} v_\varepsilon & r_{12} \\ 0 & r_{22} \end{vmatrix}} = \frac{-\, r_{21}\, v_\varepsilon}{r_{22}\, v_\varepsilon} = -\, \frac{r_{21}}{r_{22}}$$

Ma

$$r_{21} = r_b + r_m$$
$$r_{22} = r_b + r_c \qquad \text{(equazione 13-112)}$$

Per cui:

$$\left| \frac{i_c}{i_\varepsilon} \right| = \frac{r_m + r_b}{r_c + r_b} = \alpha \qquad \text{(equazione 13-116)}$$

CAPITOLO XIV

COLLAUDI

14-1. Collaudo diodi a contatto puntiforme.

Il collaudo dei diodi a contatto puntiforme si limita al controllo di alcuni punti della loro caratteristica statica. Generalmente vengono controllati due punti del ramo positivo e due punti del ramo negativo.

Per la parte positiva viene fissato un valore della corrente diretta e viene letto il corrispondente valore della caduta di tensione interna del diodo.

Per la parte negativa invece, viene fissato un valore della tensione, e viene letto il corrispondente valore della corrente inversa. La regolazione si eseguisce mediante un potenziometro, perchè se la tensione impressa è superiore a quella sopportabile dal diodo, ne può causare la distruzione.

Il circuito impiegato (fig. 14-1) è molto semplice e consiste in due batterie (B_d per la corrente diretta e B_i per la tensione inversa); un gruppo di resistenze, alimentato dalla batteria B_d, ed inseribili una alla volta, le quali costituiscono il carico limitatore di corrente per la misura della parte positiva della caratteristica; un potenziometro inserito in parallelo sulla batteria B_i, che consente la regolazione graduale della tensione inversa applicata al diodo; due commutatori (S_1 ed S_2) e 4 strumenti di lettura.

Per mezzo di tale circuito è anche possibile rilevare la curva completa, semplicemente sostituendo il gruppo di resistenze con un reostato.

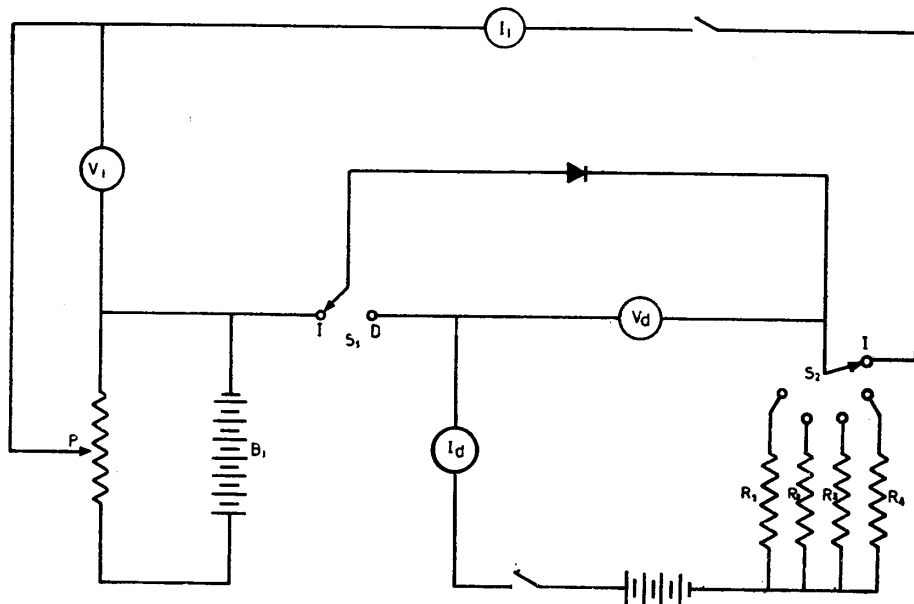



Fig. 14-1 – Schema di principio di un circuito per il collaudo (statico) dei diodi a contatto puntiforme.

14-2. Collaudo diodi di potenza.

Come è già stato osservato al paragrafo 3 del capitolo XI, il collaudo dei diodi di potenza viene di solito eseguito automaticamente con degli opportuni dispositivi, che provvedono alla selezione dei diodi stessi, ed alla classificazione per categorie, in funzione della tensione inversa che riescono a sopportare. Ogni produttore impiega sistemi diversi, che variano da caso a caso, a seconda dei tipi di diodi e del sistema di classificazione ed inoltre gli automatismi sono notevolmente diversi gli uni dagli altri.

In generale il collaudo viene eseguito dinamicamente e lo schema di principio è indicato in figura 14-2.

Mediante l'autotrasformatore variabile V si sottopone il diodo in prova ad una tensione alternativa di valore efficace ben determinato; mediante il reostato R si fissa una determinata corrente di carico. I due milliamperometri inseriti in serie agli altri due diodi, che fanno parte del circuito, dànno l'indicazione rispettivamente della corrente diretta raddrizzata e della corrente inversa di perdita.

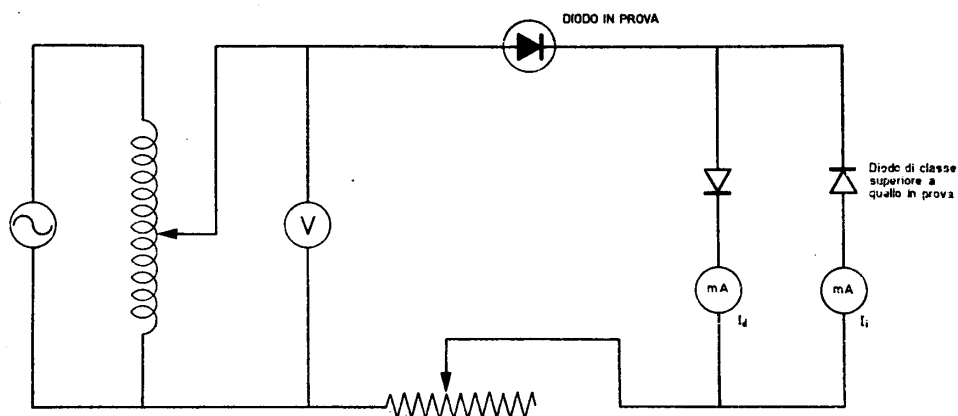



Fig. 14-2 – Schema di principio di un circuito per il collaudo (dinamico) dei diodi a giunzione.

14-3. Banco di collaudo universale per transistori.

Si è visto, considerando il transistore come un quadripolo attivo, che si possono ricavare diversi circuiti equivalenti per le tre connessioni possibili. I valori delle impedenze che compaiono nei circuiti equivalenti dipendono dal punto di lavoro, dalla frequenza, dall'ampiezza del segnale applicato e dalla temperatura.

Si è trovato sperimentalmente che i parametri misurati in bassa frequenza mantengono il loro valore per tutto il campo di frequenze in cui l'effetto della capacità del collettore e lo sfasamento fra la corrente del collettore e la corrente dell'emettitore sono trascurabili. Essenziale è invece effettuare la misura dei parametri nel punto di lavoro corrispondente a quello del circuito nel quale il transistore deve venir impiegato, e ciò a causa delle grandi variazioni che tutti i parametri subiscono in funzione delle polarizzazioni impresse al transistore.

Il collaudo di un transistore consiste appunto nell'effettuazione delle misure dei vari parametri, impiegando diversi circuiti, a seconda della configurazione del transistore e del parametro da misurare.

In pratica si fa uso di un circuito universale, che racchiude in sè tutti i circuiti parziali. Mediante opportune commutazioni si utilizza volta per volta il circuito che compete al parametro che si vuol misurare.

Lo schema di principio di uno di questi circuiti universali si può vedere in figura 14-3, ed un banco di collaudo universale (il primo fabbricato in Italia) è visibile nella tavola fuori testo.

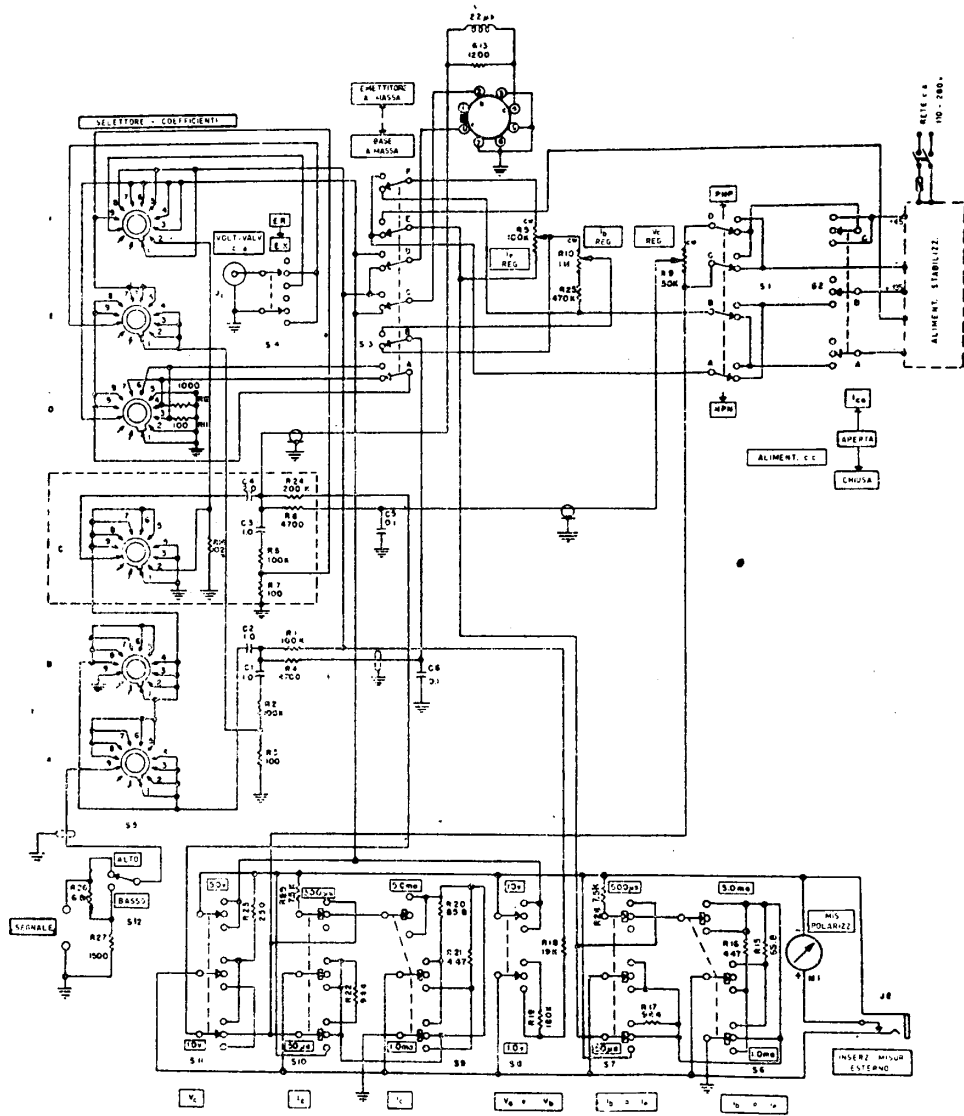



Fig. 14-3 – Schema di principio di un circuito universale per la misura dei parametri dei transistori.

CAPITOLO XV

CIRCUITI APPLICATIVI

15-1. Amplificatori B. F.

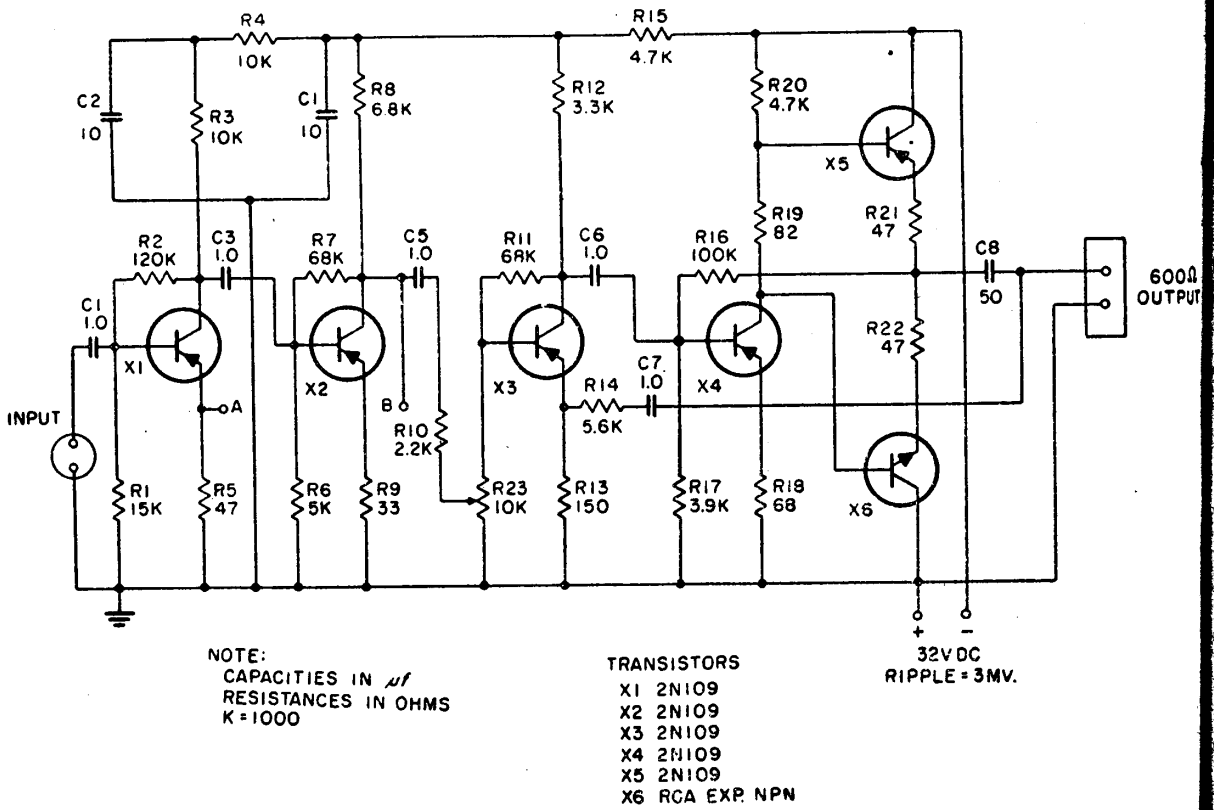



Fig. 15-1 – Preamplificatore da 20 db.

(dal « Transistors I » - R.C.A. Laboratories)

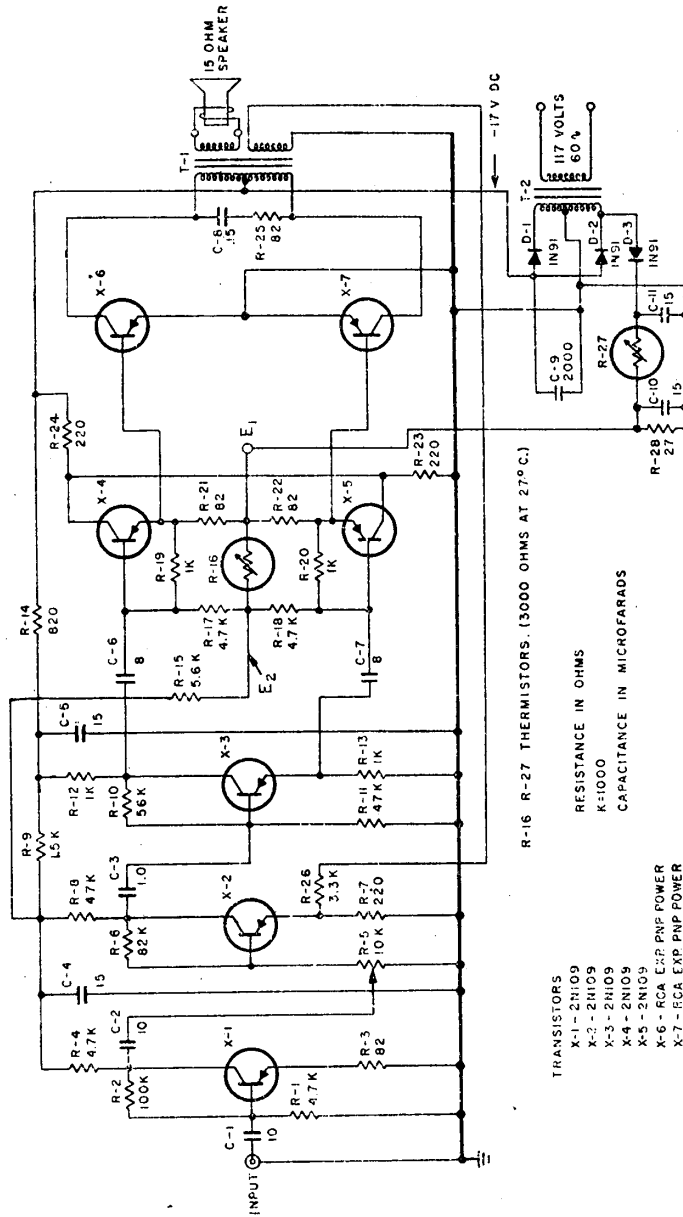



Fig. 15-2 – Amplificatore in B.F. da 5 watt.

(dal « Transistors I » - R.C.A. Laboratories)

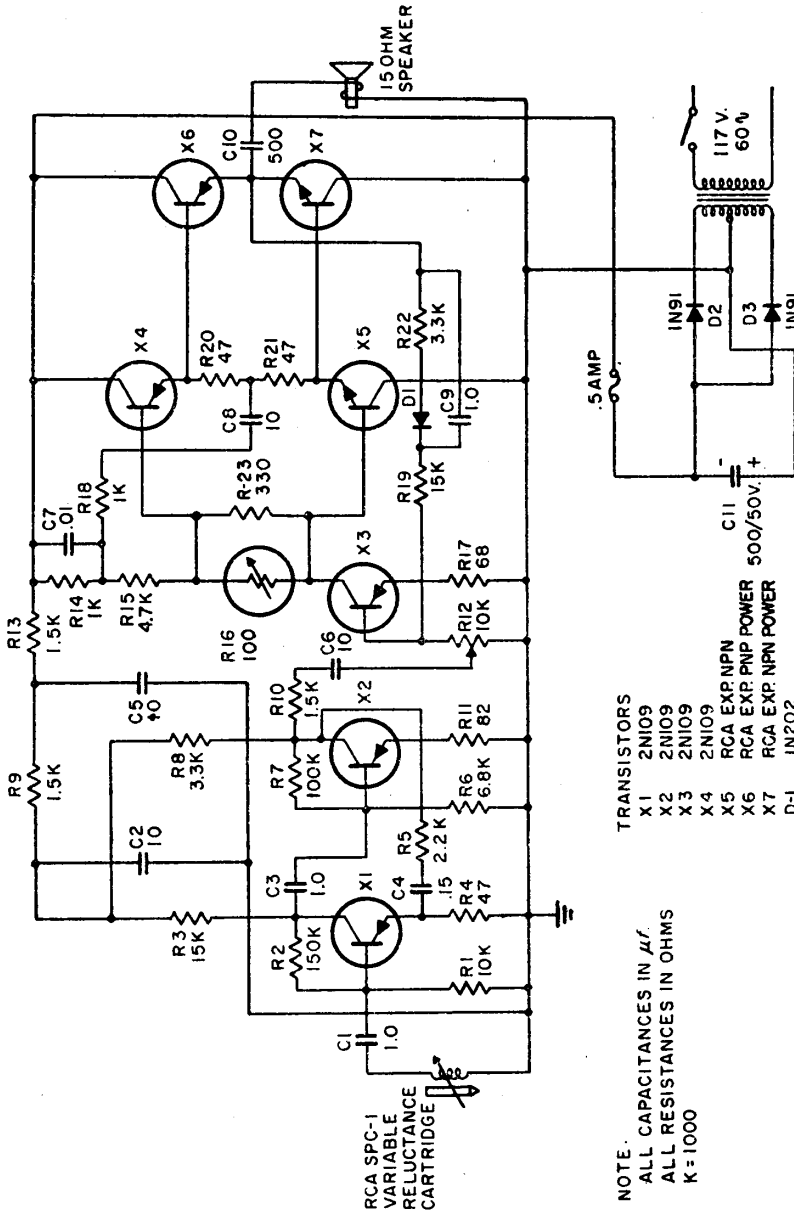



Fig. 15-3 – Amplificatore in B.F. da 5 watt a simmetria complementare.

(dal « Transistors I » - R.C.A. Laboratories)

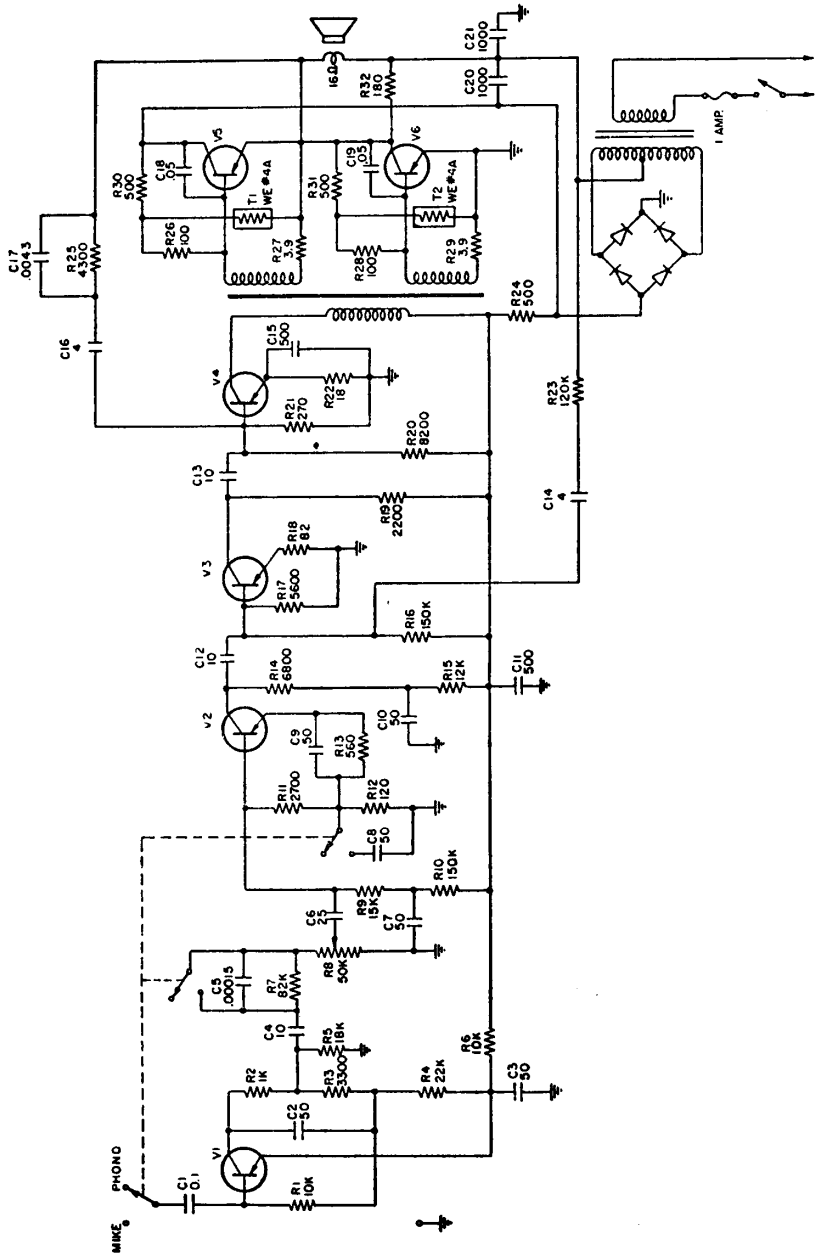



Fig. 15-4 – Amplificatore in B.F. da 20 watt.

(dal « Transistors I » - R.C.A. Laboratories)

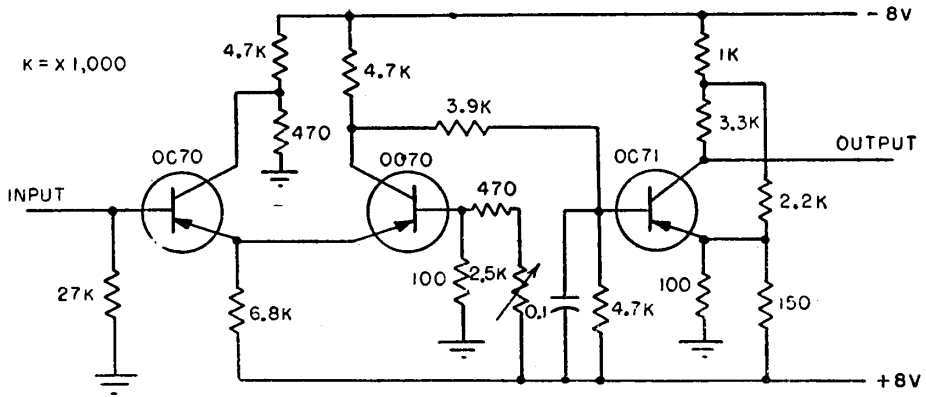



Fig. 15-5 – Amplificatore ad accoppiamento diretto con guadagno di 500 e larghezza di banda di 30 Kc senza reazione; impedenza d'entrata, circa 50 000 Ω.

(dall'« Electronics » - Luglio 1955)

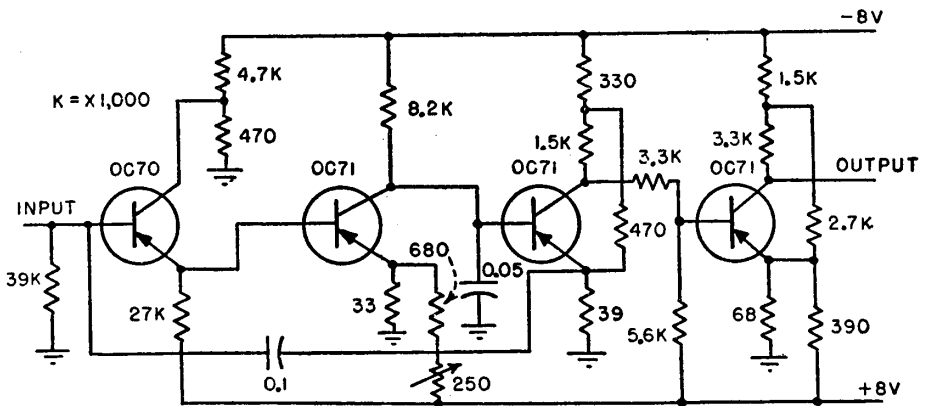



Fig. 15-6 – Amplificatore ad accoppiamento diretto con guadagno di 25 000 e tensione massima d'uscita di 4 volt su un carico di 1500 Ω.

(dall'« Electronics » - Luglio 1955)

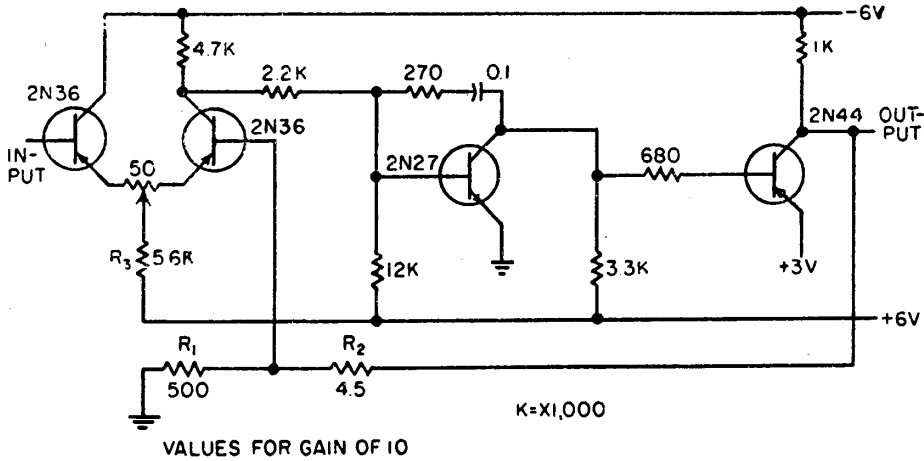



Fig. 15-7 – Amplificatore stabilizzato con controreazione.

(dall'« Electronics » - Maggio 1955)

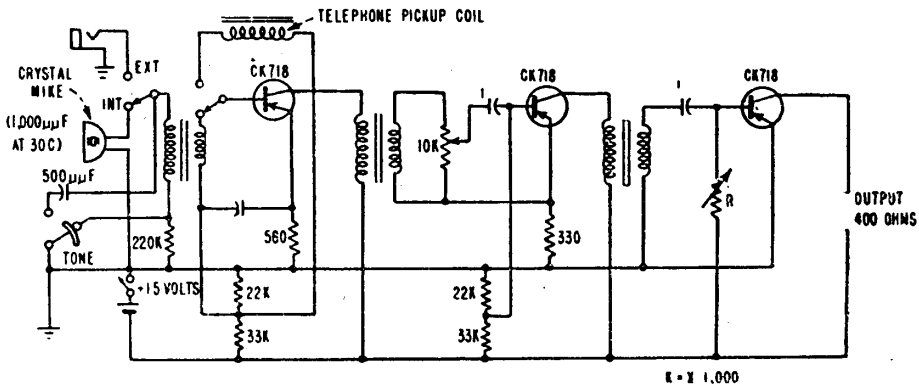



Fig. 15-8 – Amplificatore in B.F. per apparecchi acustici.

(dall'« Electronics » - Aprile 1953)

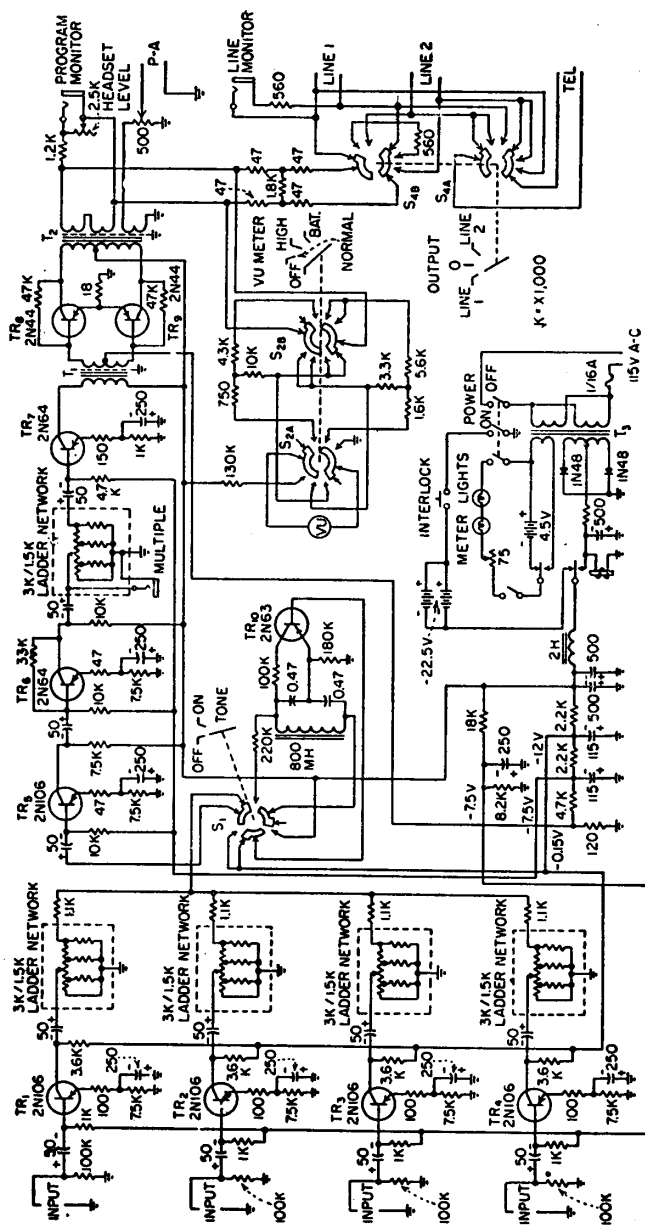



Fig. 15-9 – Amplificatore a distanza.

(dall'« Electronics » - Gennaio 1956)

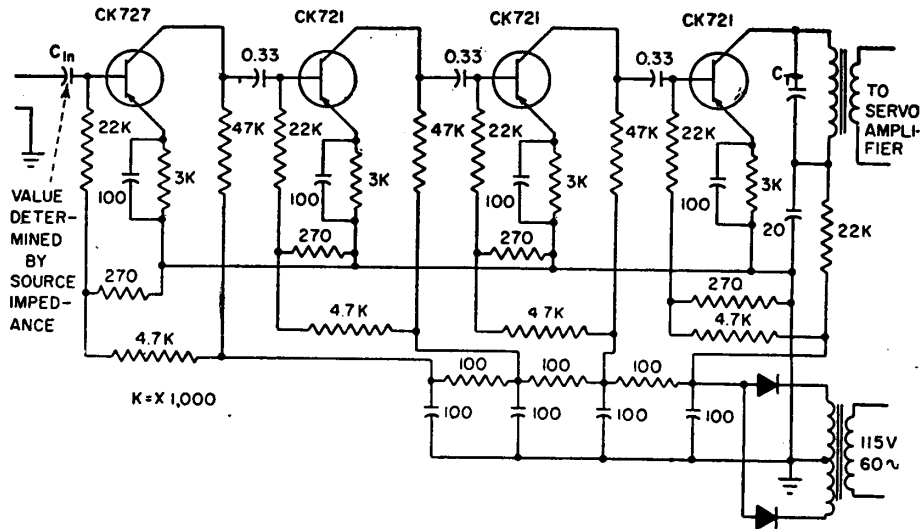



Fig. 15-10 – Preamplificatore alimentato da raddrizzatori di potenza al germanio.

(dall'« Electronics » - Febbraio 1956)

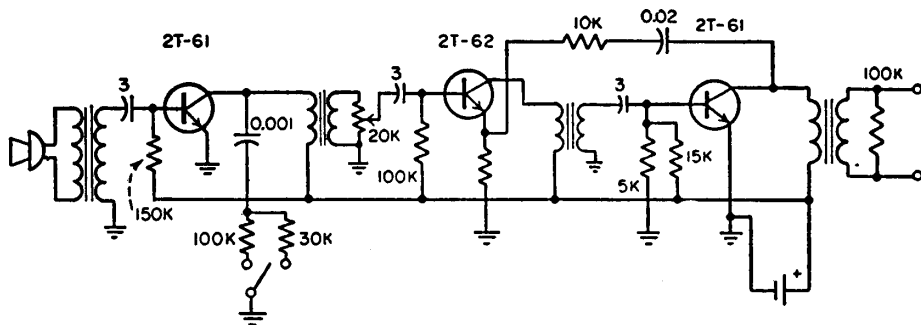



Fig. 15-11 – Amplificatore acustico per deboli d'udito.

(dall'« Electronics » - Luglio 1956)

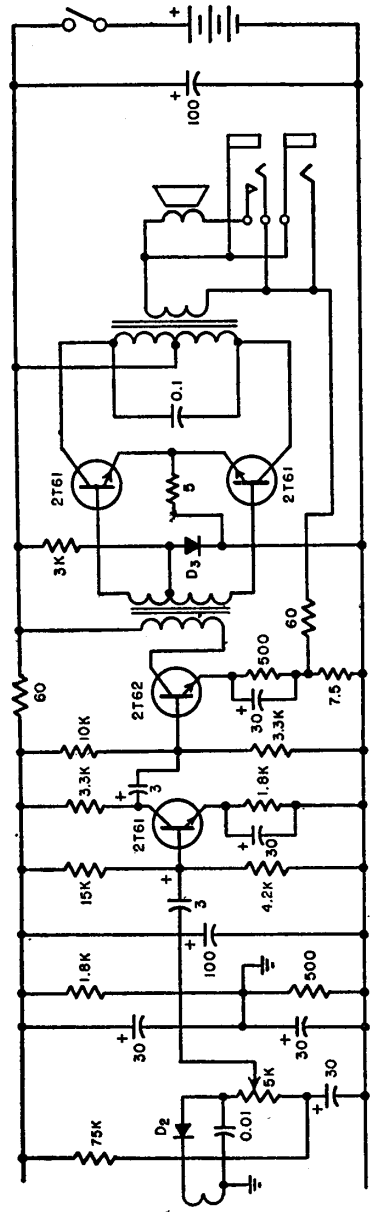



Fig. 15-12 - Amplificatore in B.F.

(dall'« Electronics » - Luglio 1956)

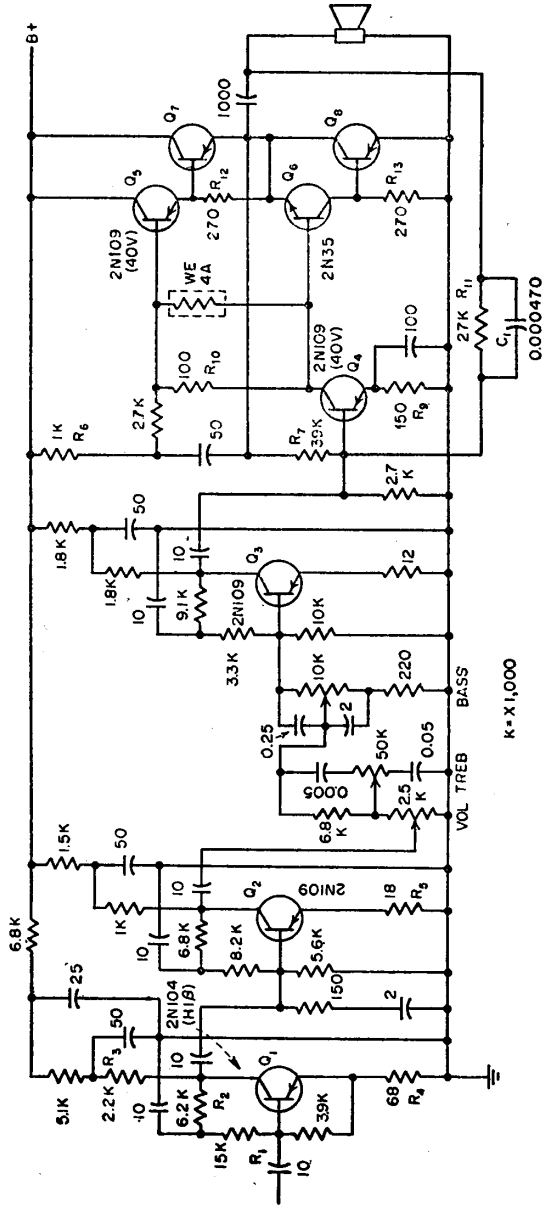



Fig. 15-13 – Amplificatore in B.F.

(dall'« Electronics » - Settembre 1956)

Fig. 15-14 – Amplificatore in B.F. da 5 watt.

[(dal « Radio-Television News » - Aprile 1956)

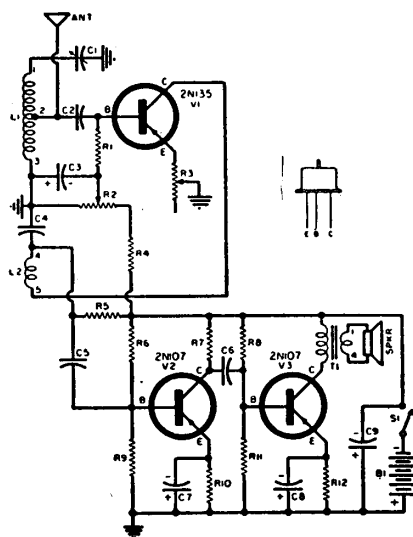
15-2. Radioricevitori.

R_1—10,000 ohm, ½ w. res.
R_2—20,000 ohm pot
R_3—500 ohm pot
R_4—100,000 ohm, ½ w. res.
R_5—4700 ohm, ½ w. res.
R_6—33,000 ohm, ½ w. res.
R_7—3900 ohm, ½ w. res.
R_8—6800 ohm, ½ w. res. (see text)
R_9, R_{11}—2200 ohm, ½ w. res.
R_{10}, R_{12}—470 ohm, ½ w. res.
C_1—365 μμfd. tuning capacitor
C_2—500 μμfd. paper or mica capacitor
C_3—2 μfd., 12 v. elec. capacitor.
C_4—.01 μfd., 200 v. capacitor
C_5, C_6—1 μfd., 200 v. capacitor
C_7, C_8—10 μfd., 3 v. elec. capacitor
C_9—50 μfd., 12 v. elec. capacitor
L_1, L_2—See Fig. 2
T_1—Output trans., 2500 to 13,000 ohm push-pull plates to v.c. (Chicago RO-304)
S_1—S.p.s.t. switch
B_1—Two 6-volt cells in series (Burgess Z-4, see text)
V_1—"p-n-p" junction transistor (G-E Type 2N135)
V_2, V_3—"p-n-p" junction transistor (G-E Type 2N107)

Fig. 15-15 – Ricevitore a reazione.

(dal « Radio Television News » - Ottobre 1956)

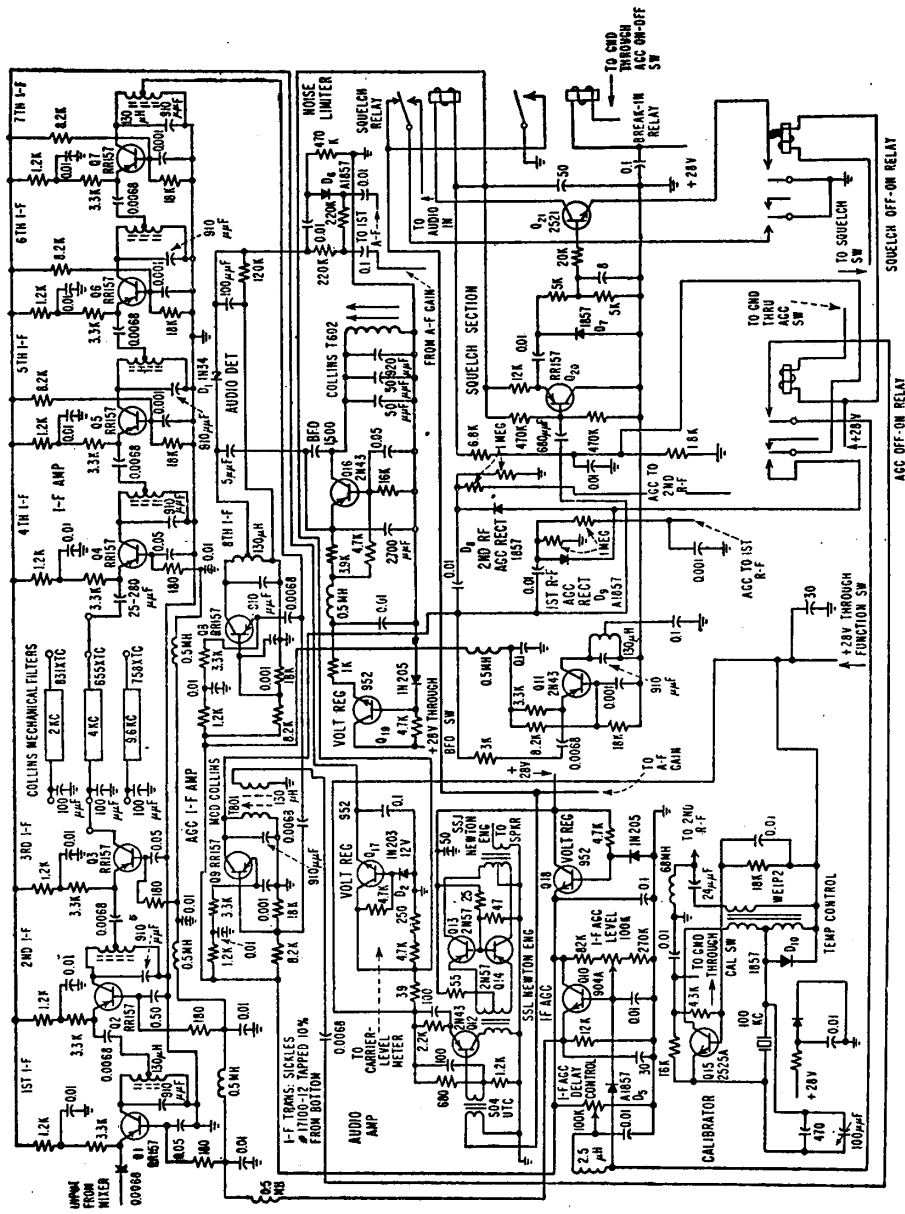



Fig. 15-16 – Parte M.F. e B.F. di un ricevitore militare per mezzi mobili.

(dall'« Electronics » - Ottobre 1956)

Fig. 15-17 – Ricevitore tascabile.

(dal « P.I.R.E. » - Giugno 1955)

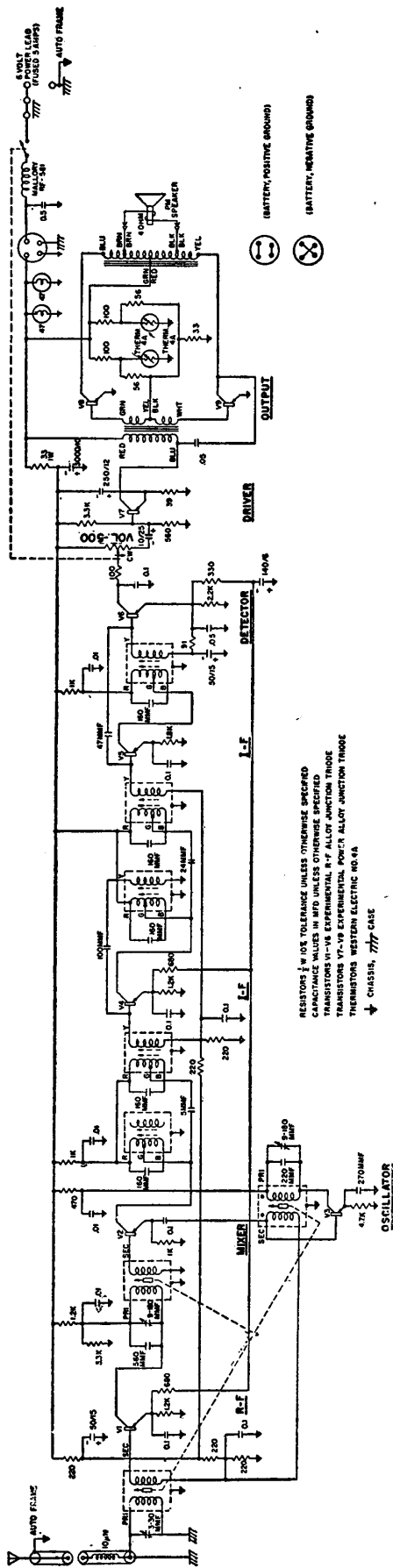



Fig. 15-18 – Ricevitore sperimentale per automobile.

(dal « Radio Television News » - Luglio 1955)

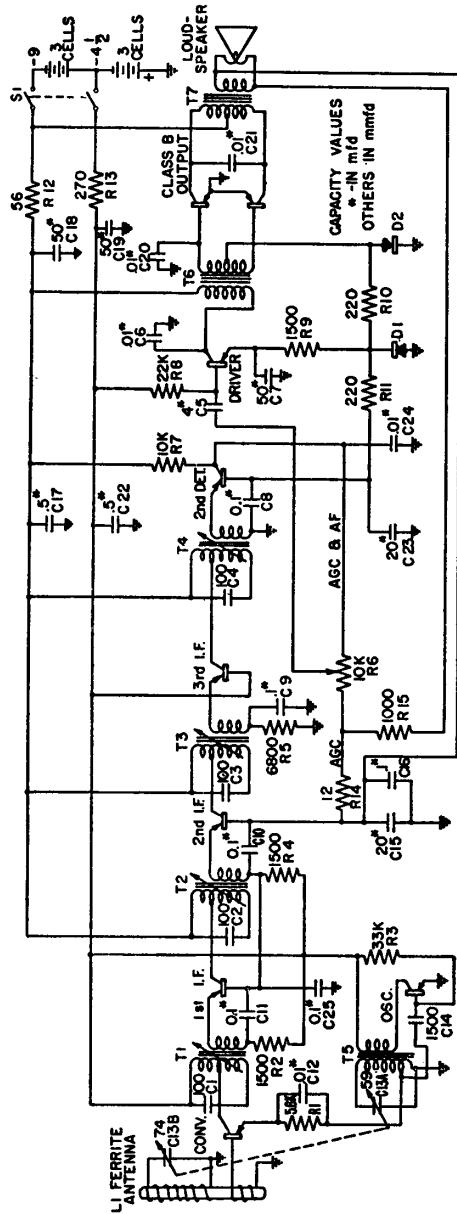



Fig. 15-19 – Ricevitore sperimentale.

(dal « P.I.R.E. » - Luglio 1954)

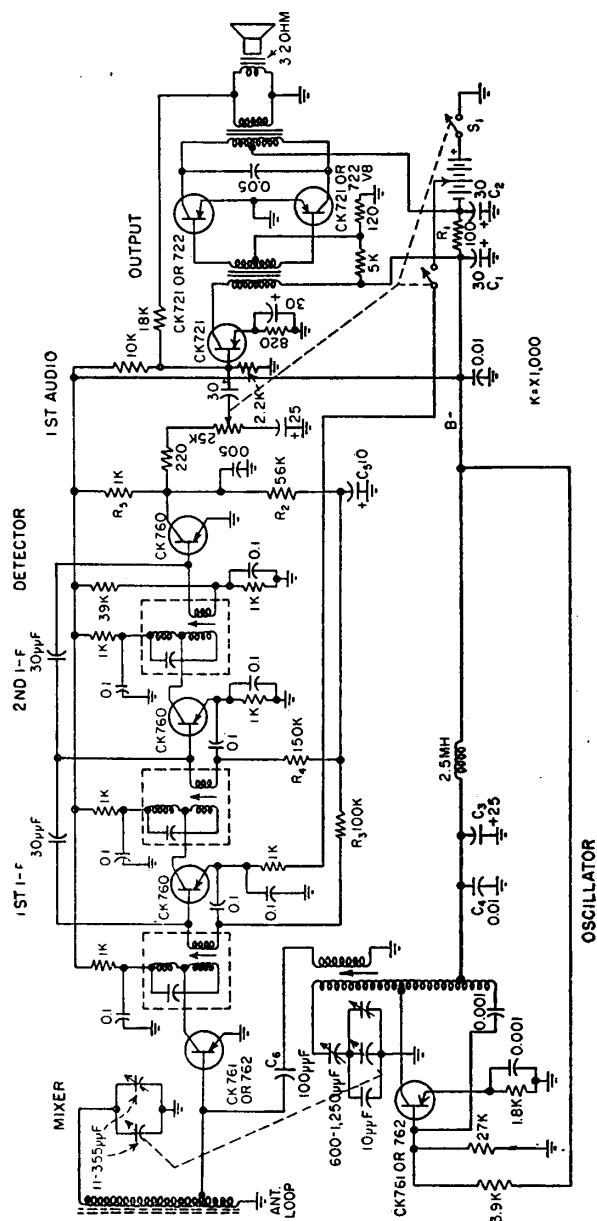



Fig. 15-20 – Ricevitore portatile.

(dall'« Electronics » - Marzo 1955)

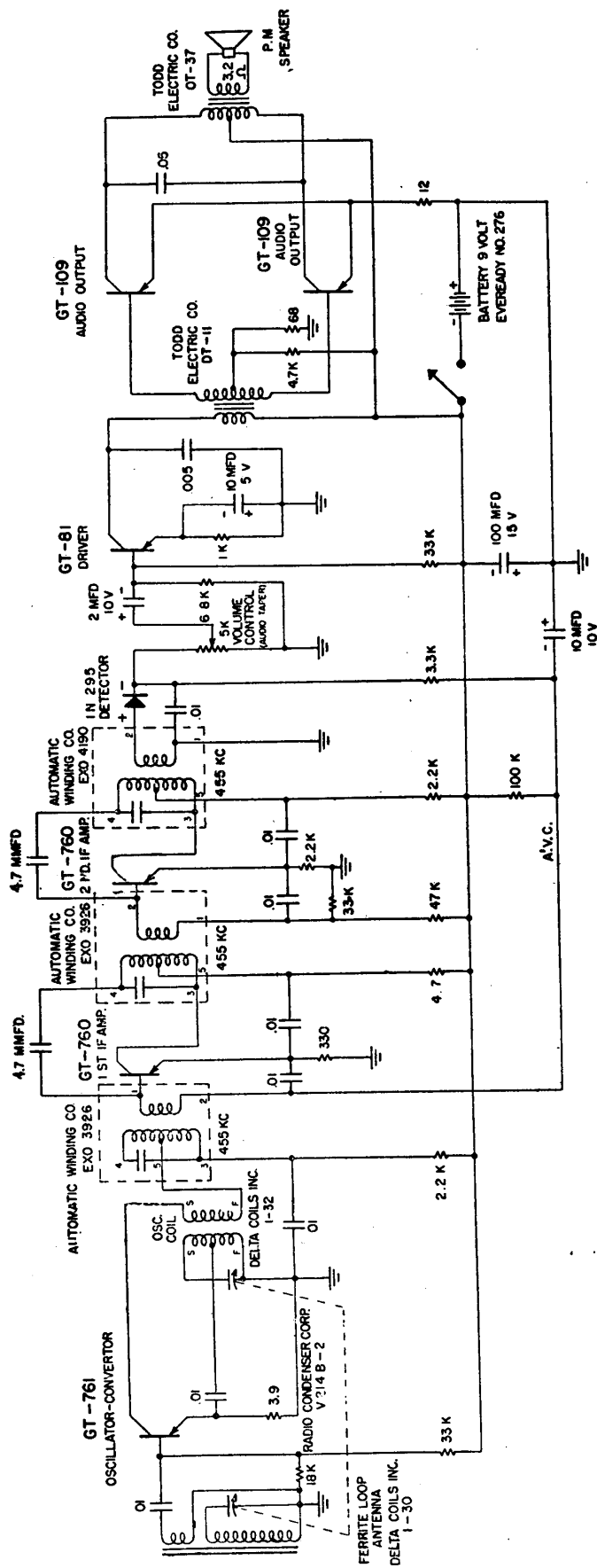



Fig. 15-21 – Radio portatile a 6 transistori della General Transistor Corp.

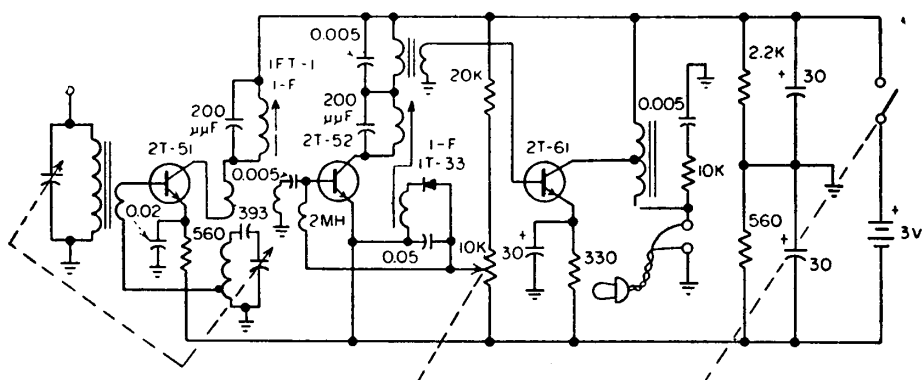



Fig. 15-22 – Radioricevitore tascabile a 3 transitori.

(dall'« Electronics » - Luglio 1956)

Fig. 15-23 – Ricevitore portatile a 3 transistori.

(dal « Radio Television News » - Settembre 1955)

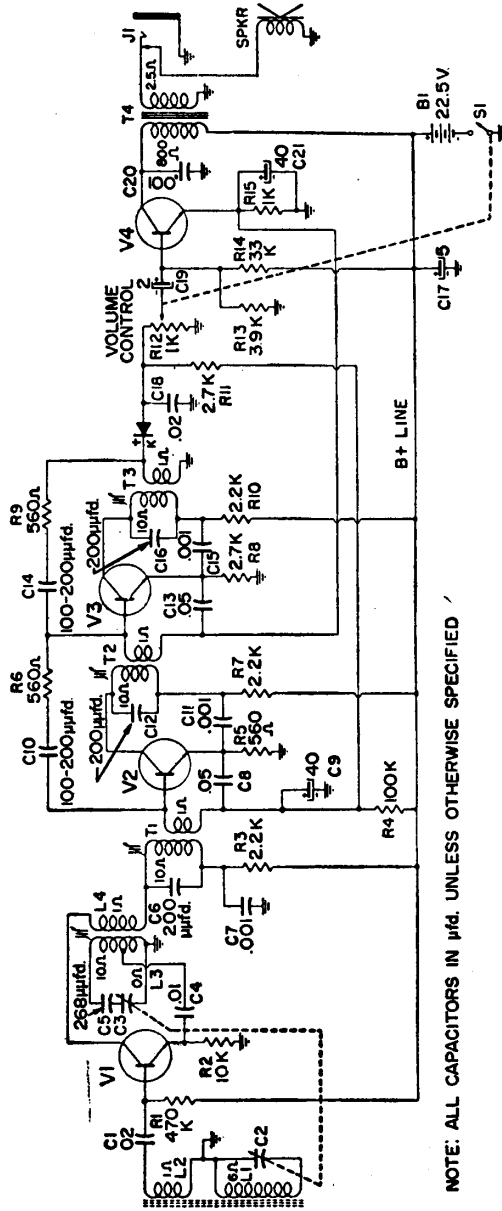



Fig. 15-24 - Radio portatile a 4 transistori - Modello TR-1 Regency.

(dal « Radio Television News » - Gennaio 1956)

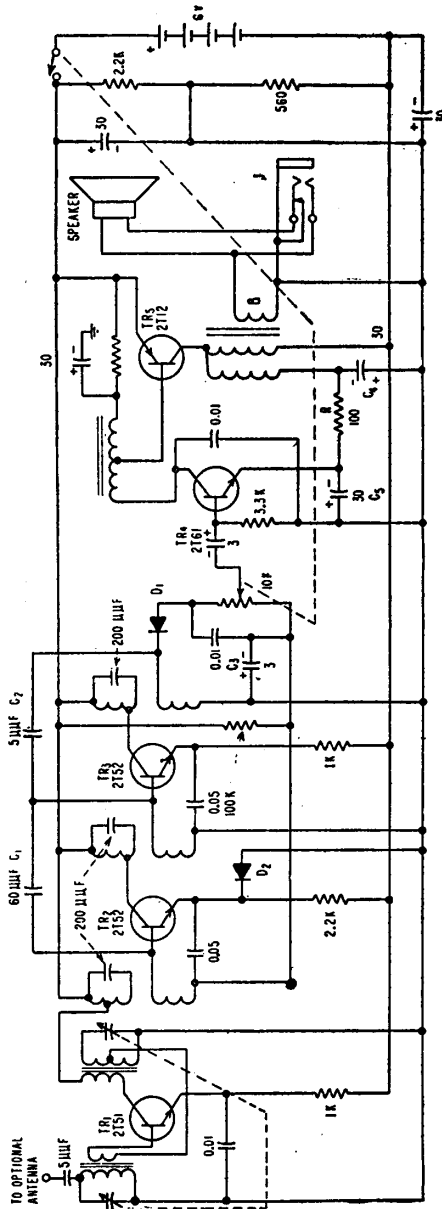



Fig. 15-25 – Radioricevitore portatile a 5 transistori.

(dall'« Electronics » - Luglio 1956)

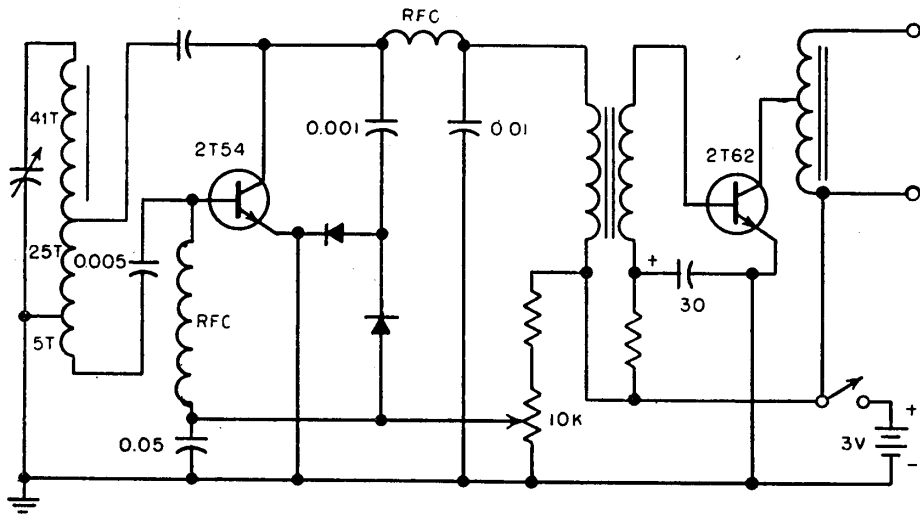



Fig. 15-26 – Radioricevitore a reazione a 2 transistori.

dall'« Electronics » - Luglio 1956)

15-3. Oscillatori.

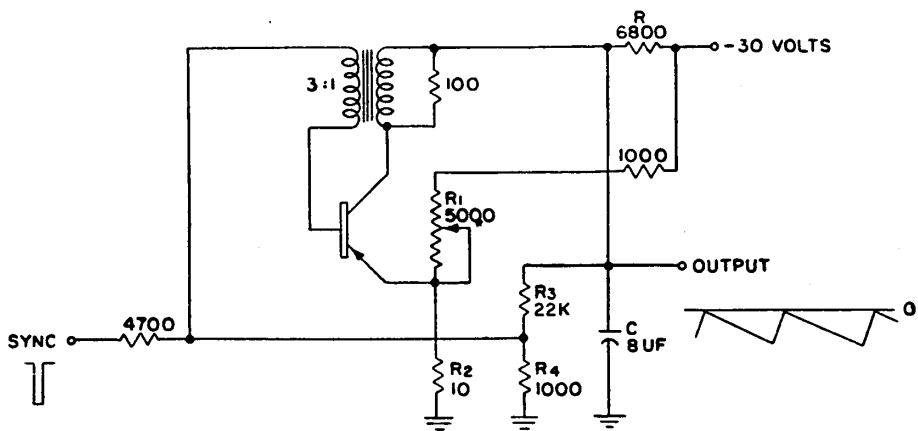



Fig. 15-27 – Oscillatore bloccato a dente di sega.

(dal « Transistors I » - R.C.A. Laboratories)

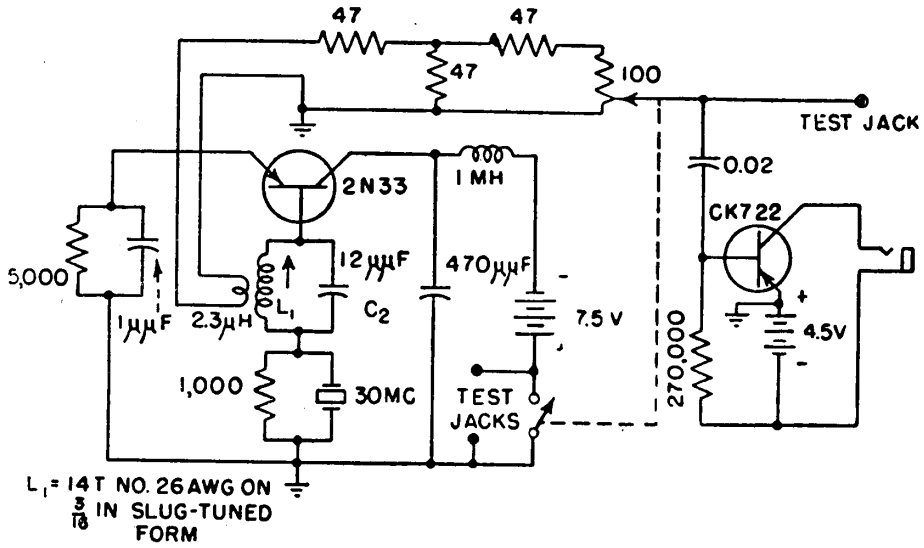



Fig. 15-28 – Oscillatore a 30 mc/sec.

(dall'« Electronics » - Settembre 1954)

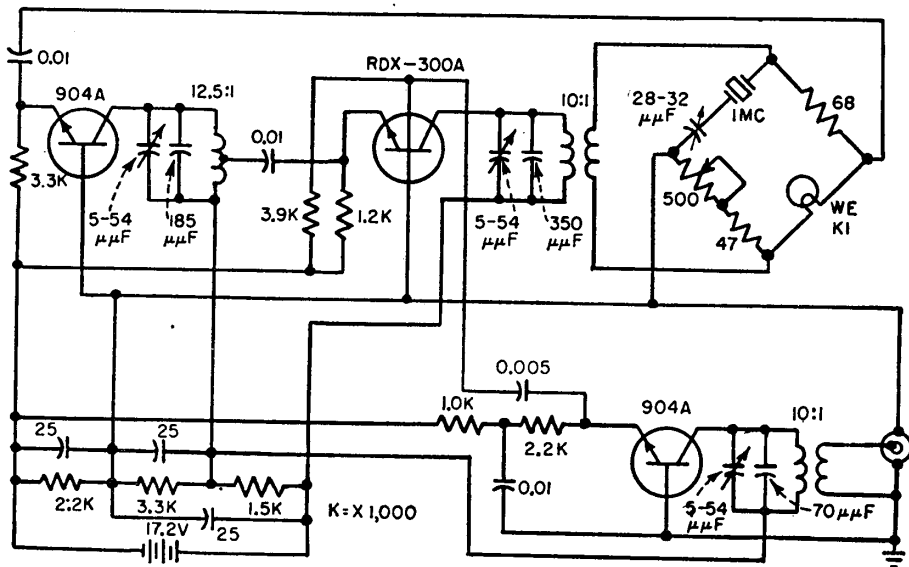



Fig. 15-29 – Oscillatore a ponte di Meacham.

(dall'« Electronics » - Marzo 1956)

FREQ (CPS)	20	200	2,000	20,000
C (μF)	2	0.2	0.02	0.002

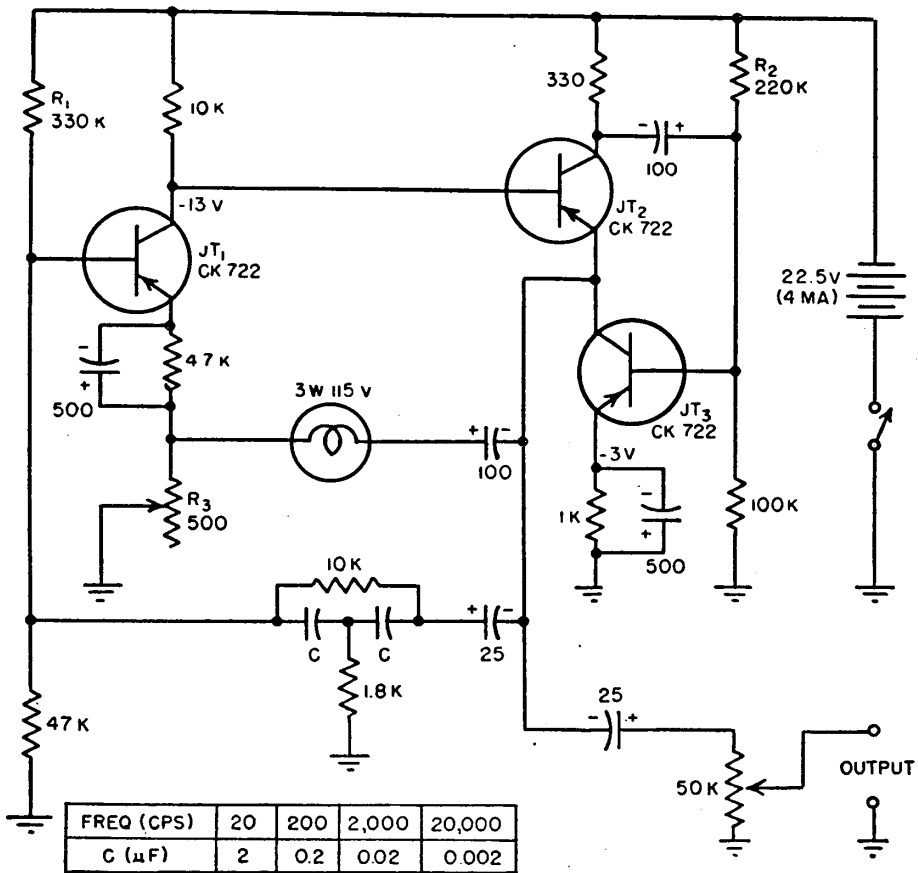



Fig. 15-30 - Oscillatore a B.F.

(dall'« Electronics » - Settembre 1953)

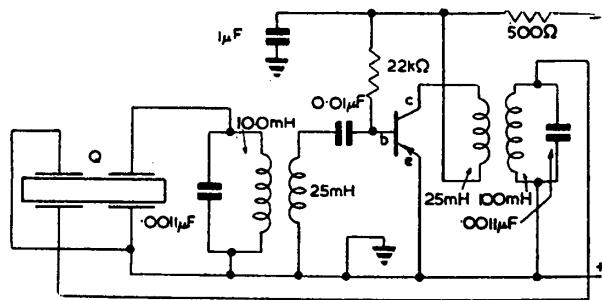



Fig. 15-31 – Oscillatore con quarzo vibratore a 15 Kc/sec.

(dall'« Electronic Engineering » - Aprile 1955)

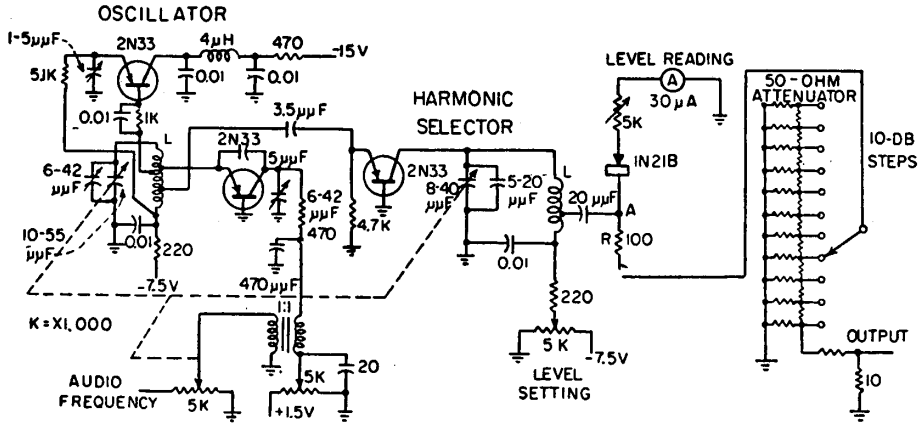



Fig. 15-32 – Oscillatore modulato mediante transistore a reattanza nella banda v.h.f.

(dall'« Electronics » - Febbraio 1955)

15-4. Altri circuiti.

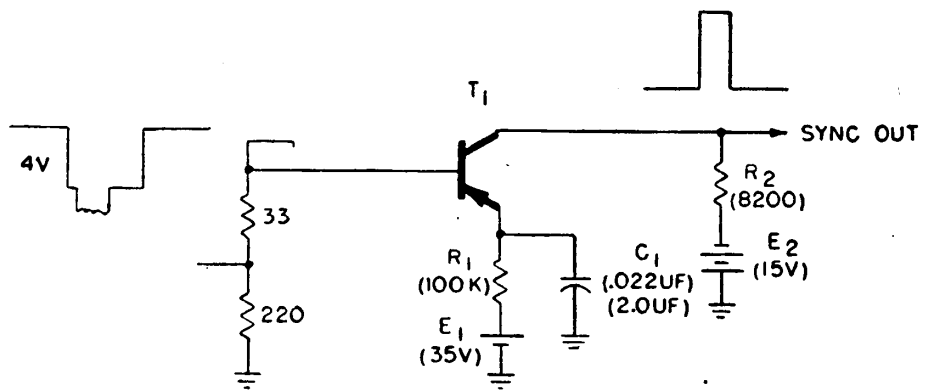



Fig. 15-33 – Separatore di sincronismo ad uno stadio.

(dal « Transistors I » - R.C.A. Laboratories)

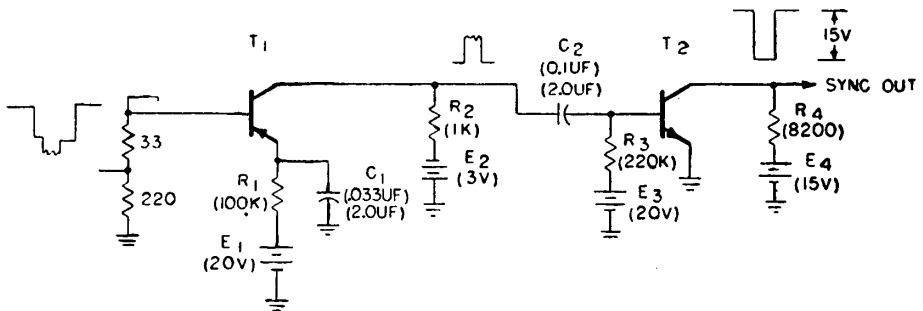



Fig. 15-34 – Separatore di sincronismo a doppio stadio.

(dal « Transistors I » - R.C.A. Laboratories)

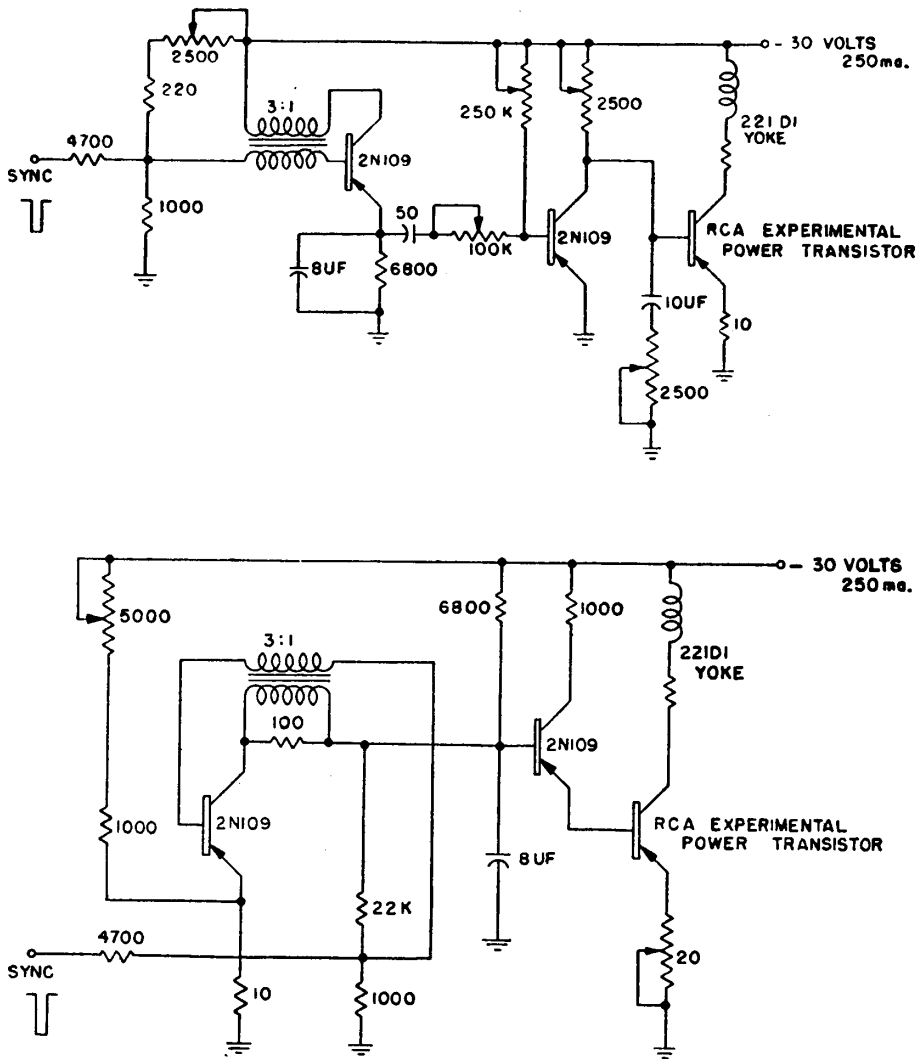



Fig. 15-35 – Sistema di deflessione verticale:

— pilotaggio con emettitore a massa;

— pilotaggio con collettore a massa.

(dal « Transistors I » - R.C.A. Laboratories)

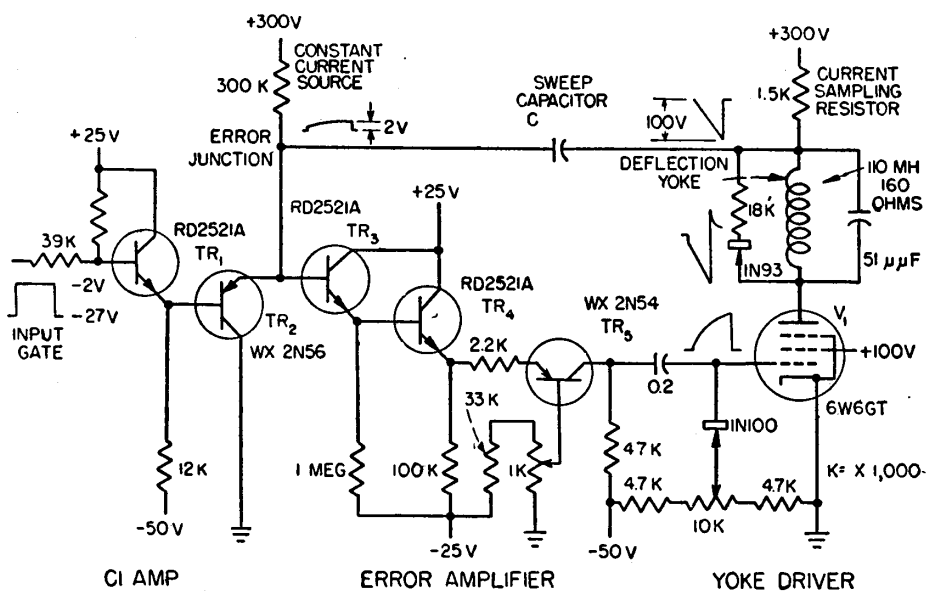



Fig. 15-36 – Sistema di deflessione per tubo a raggi catodici.

(dall'« Electronics » - Luglio 1955)

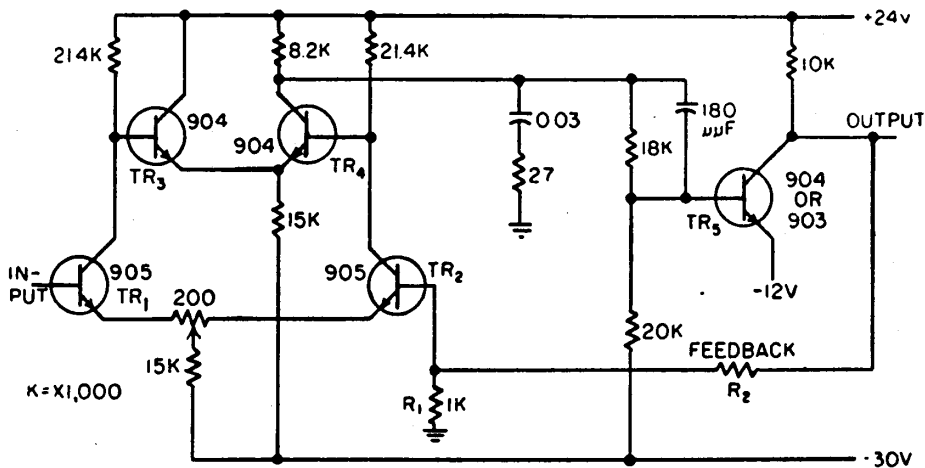



Fig. 15-37 – Amplificatore per tensioni continue.

(dall'« Electronics » - Maggio 1955)

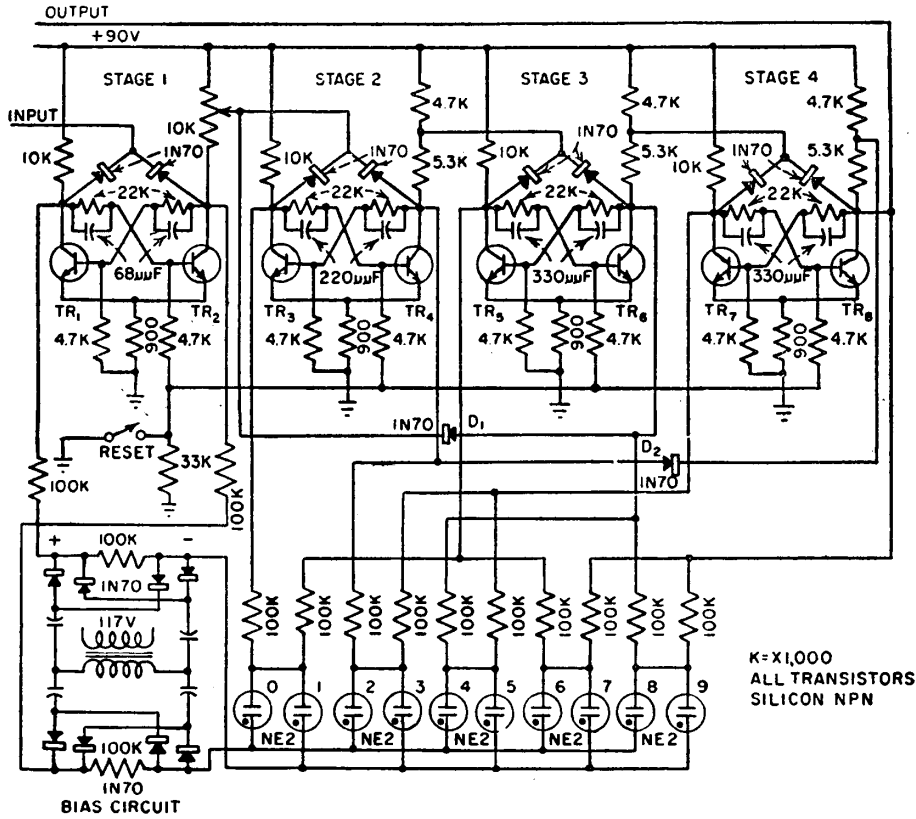



Fig. 15-38 - Contatore a decadi.

(dall'« Electronics » - Agosto 1955)

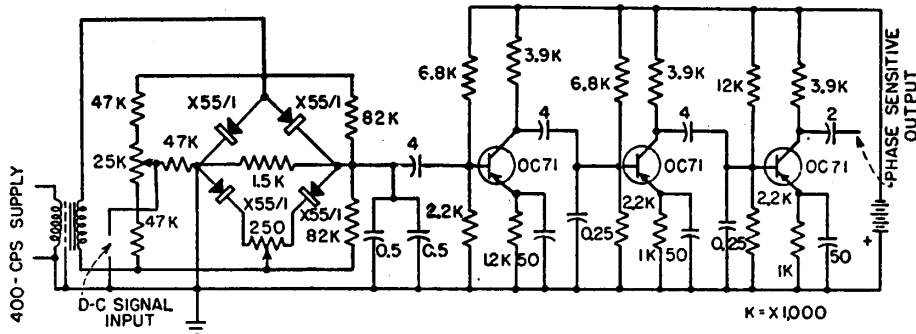



Fig. 15-39 – Modulatore con ponte a doppia semionda ed amplificatore a 3 stadi.

(dall'« Electronics » - Settembre 1955)

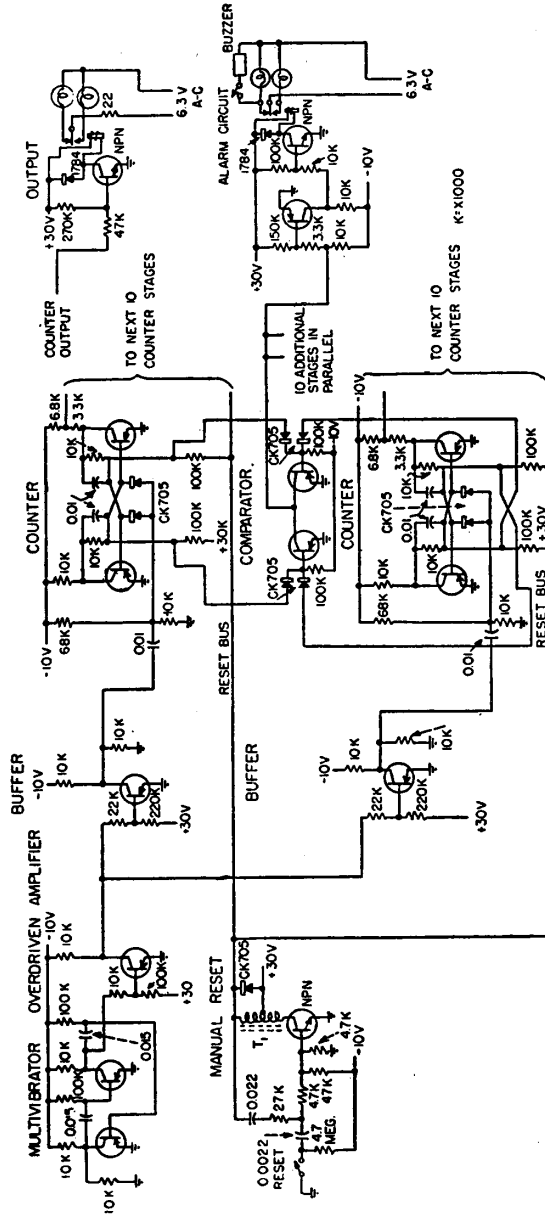



Fig. 15-40 – Sistema di commutazione.

(dall'« Electronics » - Gennaio 1955)

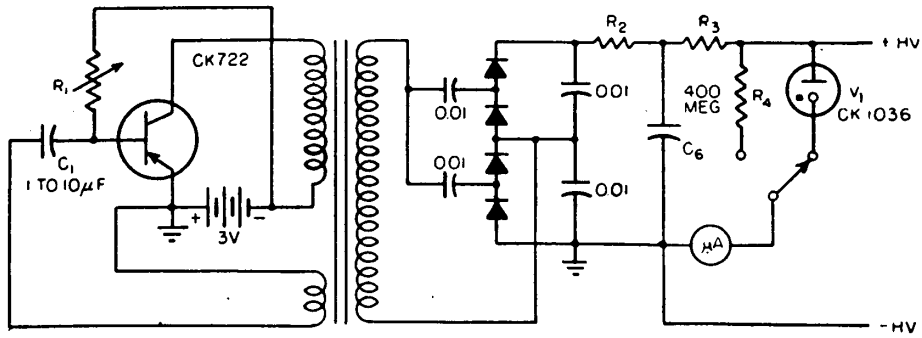



Fig. 15-41 – Alimentatore di potenza ad alta tensione.

(dall'« Electronics » - Agosto 1954)

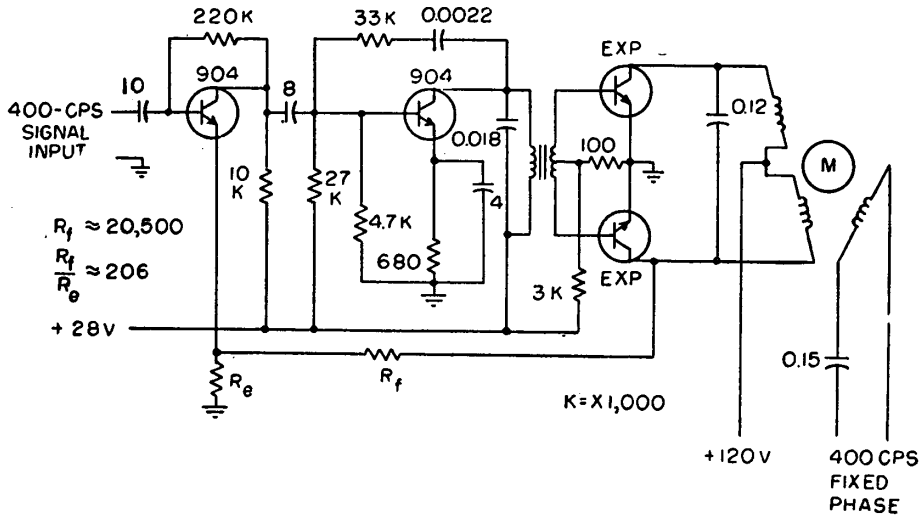



Fig. 15-42 – Servo amplificatori.

(dall'« Electronics » - Gennaio 195)

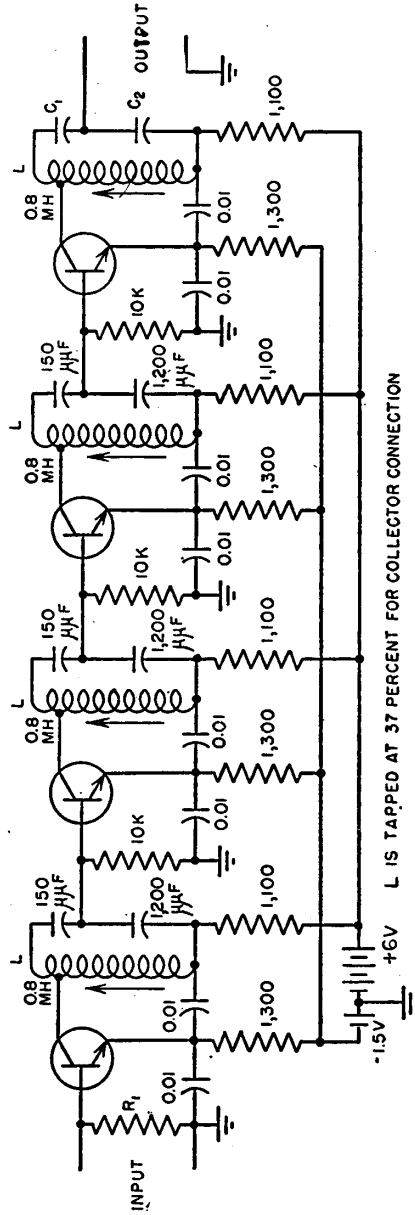



Fig. 15-43 – Amplificatore a 455 Kc con guadagno di potenza di 58 db e banda passante di 14 Kc.

(dall'« Electronics » - Aprile 1954)

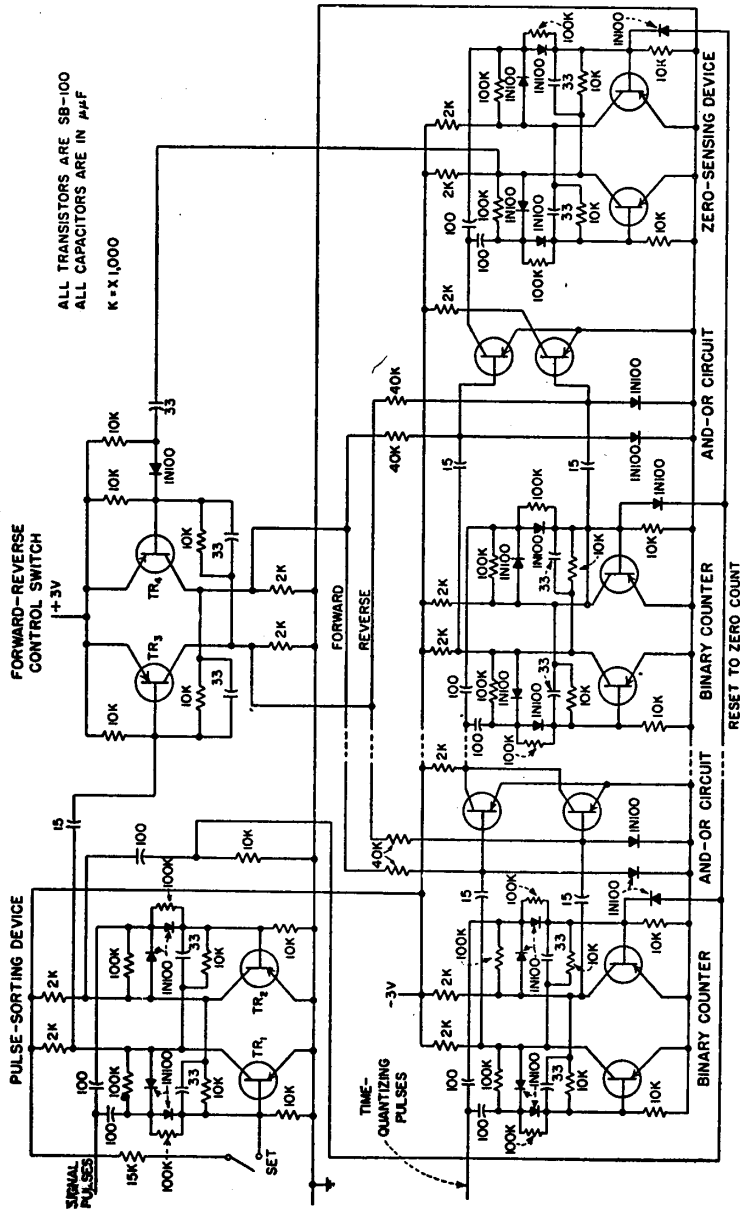



Fig. 15-44 – Contatore binario reversibile ad alta velocità.

(dall'« Electronics » - Marzo 1956)

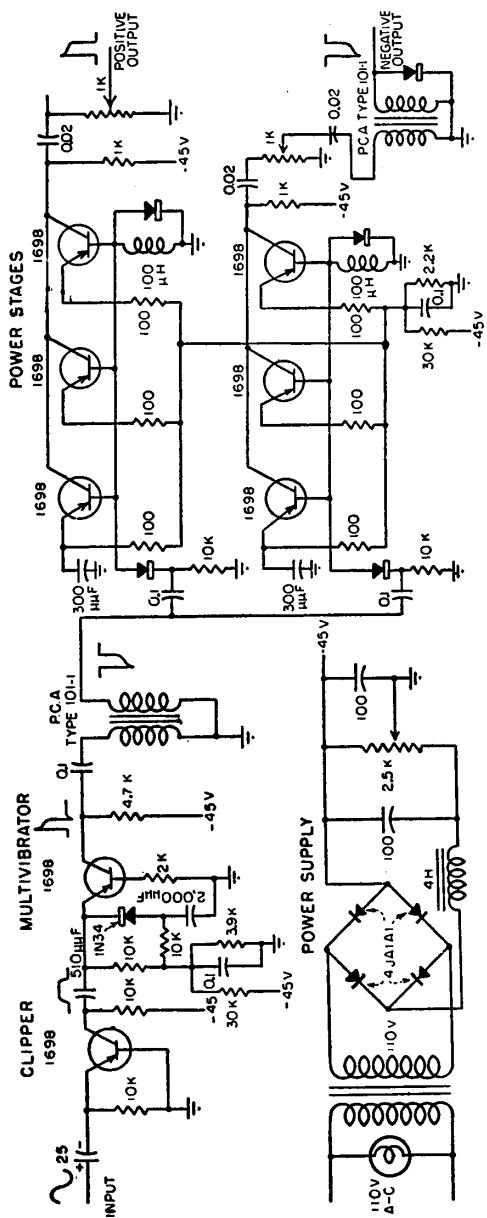



Fig. 15-45 – Convertitore di onde sinusoidali in impulsi.

(dall'« Electronics » - Maggio 1954)

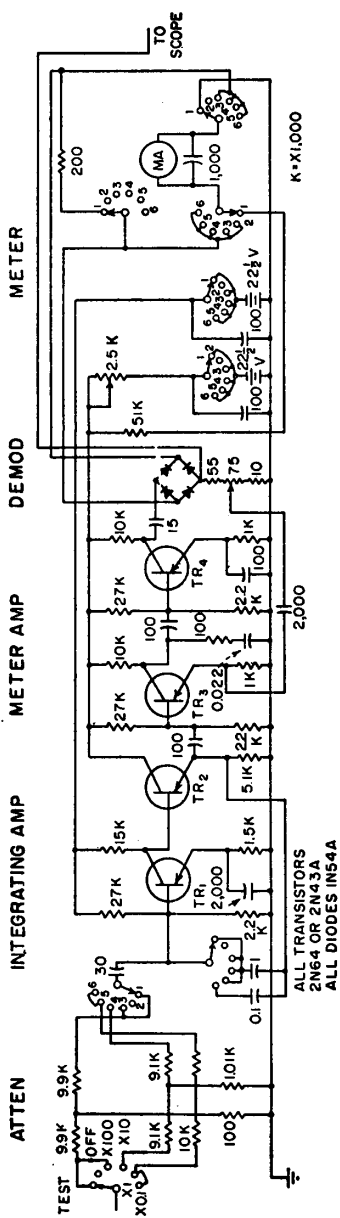



Fig. 15-46 – Misuratore di vibrazioni.

(dall'« Electronics » - Aprile 1956)

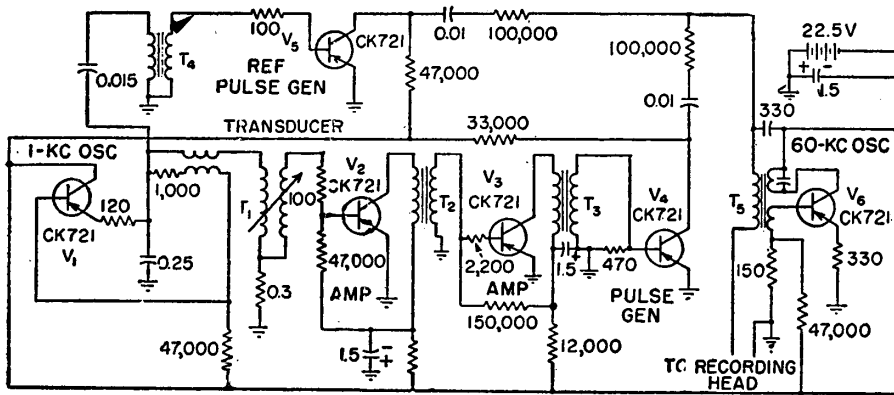



Fig. 15-47 – Modulatore.

(dall'« Electronics » - Giugno 1956)

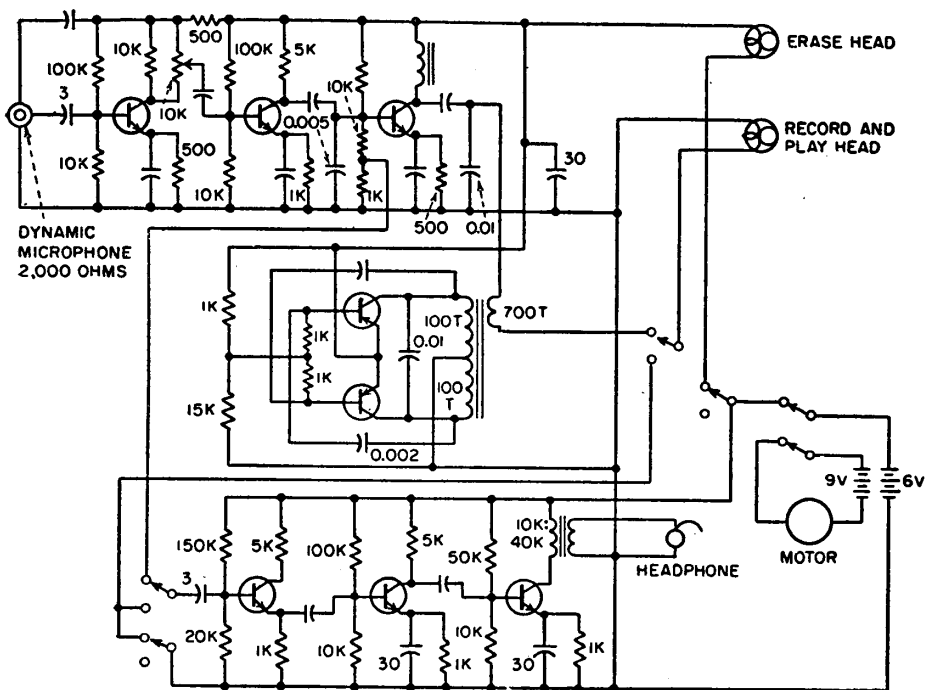



Fig. 15-48 – Registratore a pile.

(dall'« Electronics » - Luglio 1956)

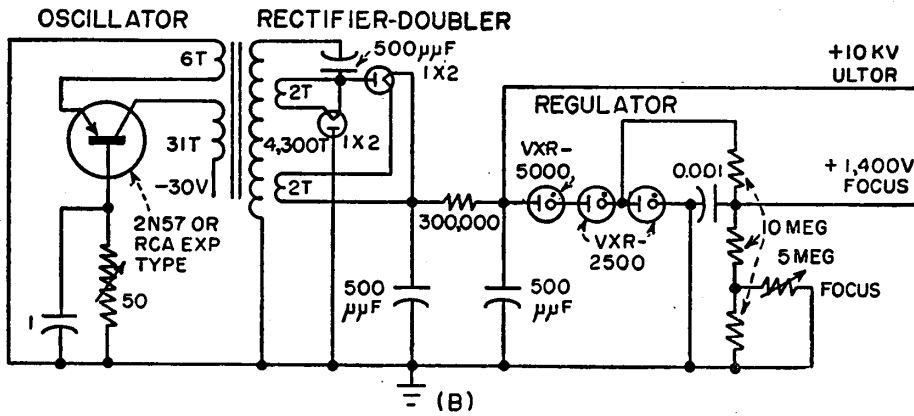



Fig. 15-49 – Alimentatore per tubo a raggi catodici.

(dall'« Electronics » - Settembre 1956)

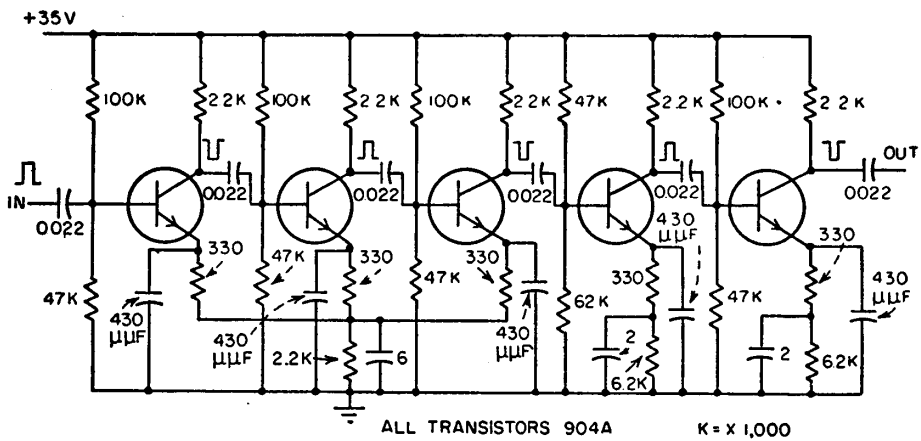



Fig. 15-50 – Amplificatore per video radar.

(dall'« Electronics » - Agosto 1956)

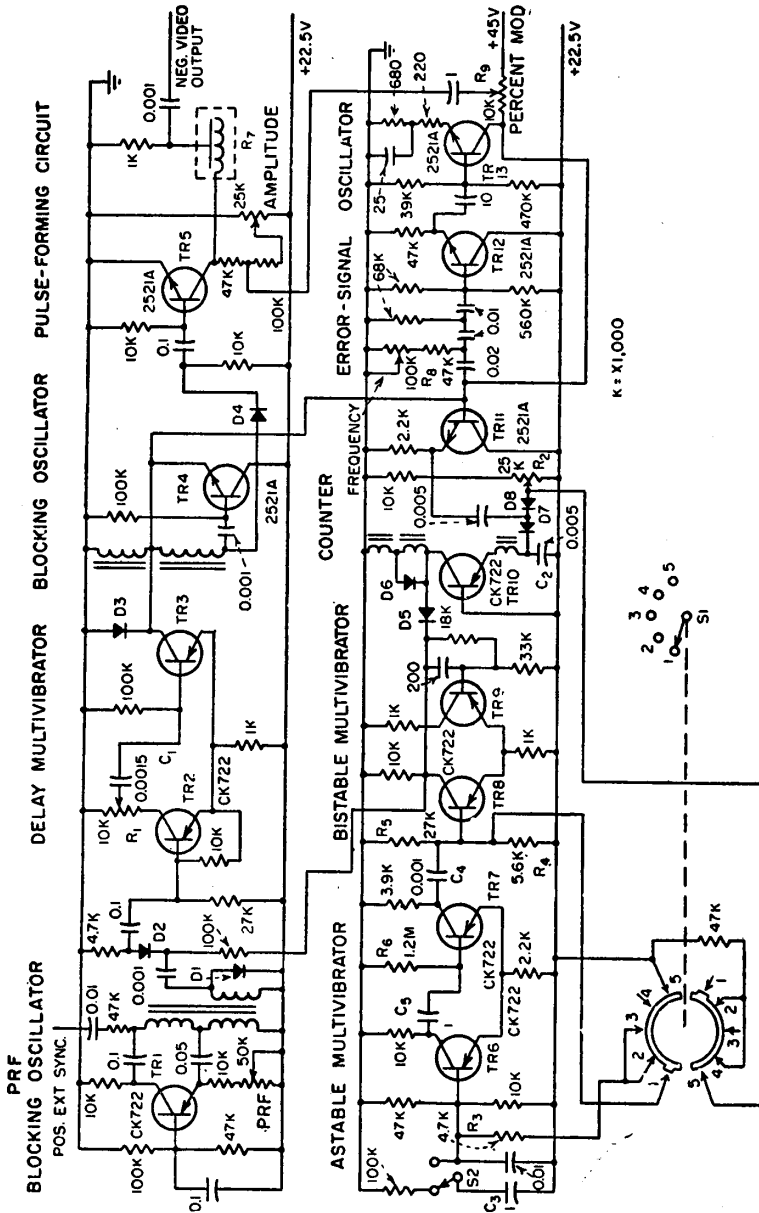



Fig. 15-51 – Generatore per collaudo radar.

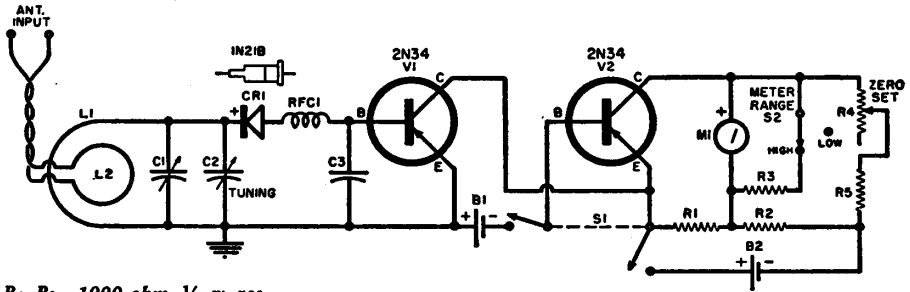
(dall'« Electronics » - Maggio 1956)

R_1, R_2—1000 ohm, ½ w. res.
R_3—220 ohm, ½ w. res.
R_4—1000 ohm wirewound pot
R_5—820 ohm, ½ w. res.
C_1-C_2—100/100 μμfd. 2-gang var. capacitor, gangs connected in parallel (Hammarlund HFD-100, see text)
C_3—.002 μfd. mica capacitor
RFC_1—2½ mhy. r.f. choke
L_1—Hairpin loop, #20 bare copper wire, ⅜" separation between legs, 13/16" total over-all length
L_2—Single turn of insulated hookup wire, ¾" dia., spaced 1/16" from L_1
M_1—0-50 μa. d.c. microammeter (Triplett 327-T)
S_1—D.p.s.t. toggle switch
S_2—S.p.s.t. wafer switch
B_1, B_2—1½ volt jumbo flashlight cell (Ray-O-Vac 2LP)
CR_1—1N21B point-contact silicon diode (Sylvania)
V_1, V_2—2N34 junction transistor (Sylvania)

Fig. 15-52 – Misura di intensità di campo TV.

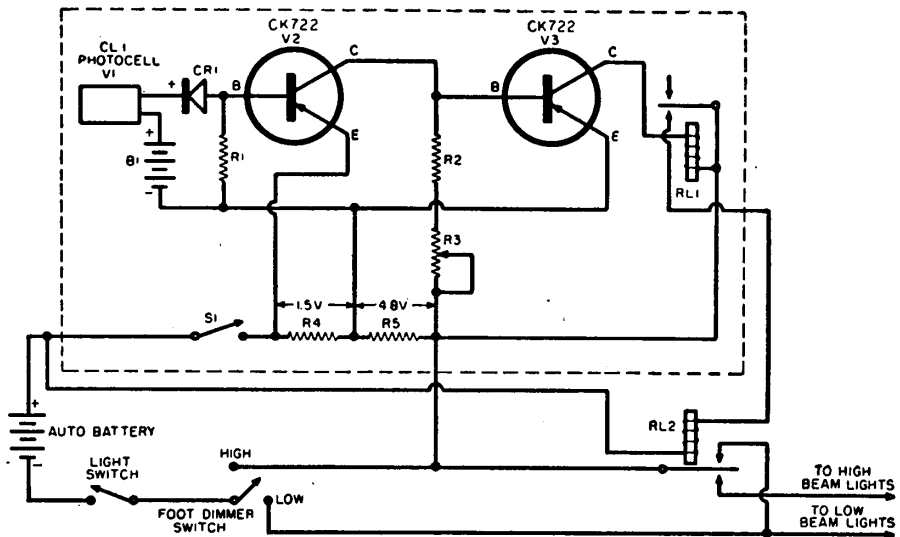
(dal « Radio Television News » - Gennaio 1956)

R_1—100,000 ohm, ½ w. res.
R_2—10,000 ohm, ½ w. res.
R_3—25,000 ohm pot ("Sensitivity" control)
R_4—70 ohm, ½ w. res.
R_5—300 ohm, 1 w. res.
RL_1—1 ma. sensitive relay (see text)
RL_2—S.p.d.t., 6.3 v. d.c. relay
S_1—S.p.s.t. toggle switch
B_1—90 v. battery (Burgess #N60, Eveready #490, or equiv.)
CR_1—1N91 junction diode
V_1—Photocell (Clairex Corp. CL-1, 50 West 26th St., N. Y. 10, N. Y. $2.50 each)
V_2, V_3—Junction transistor (Raytheon CK722)

Fig. 15-53 – Commutatore automatico per fari d'automobile.

(dal « Radio Television News » - Agosto 1955)

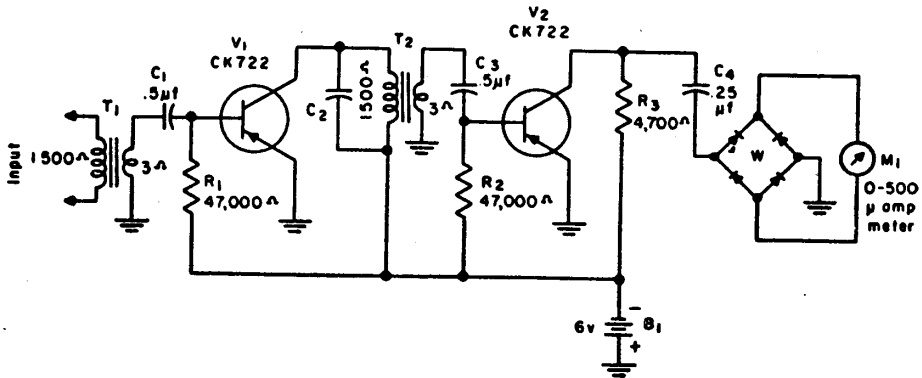



Fig. 15-54 – Circuito rivelatore di zero a ponte.

(dal « Radio Television News » - Ottobre 1953)

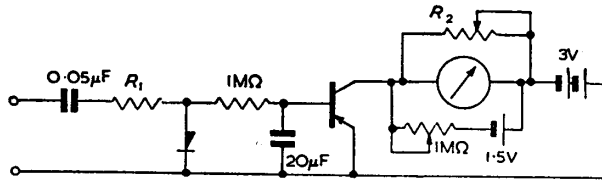



Fig. 15-55 – Voltmetro in c. a. ad alta impedenza d'entrata.

(dall'« Electronic Engineering » - Agosto 1955)

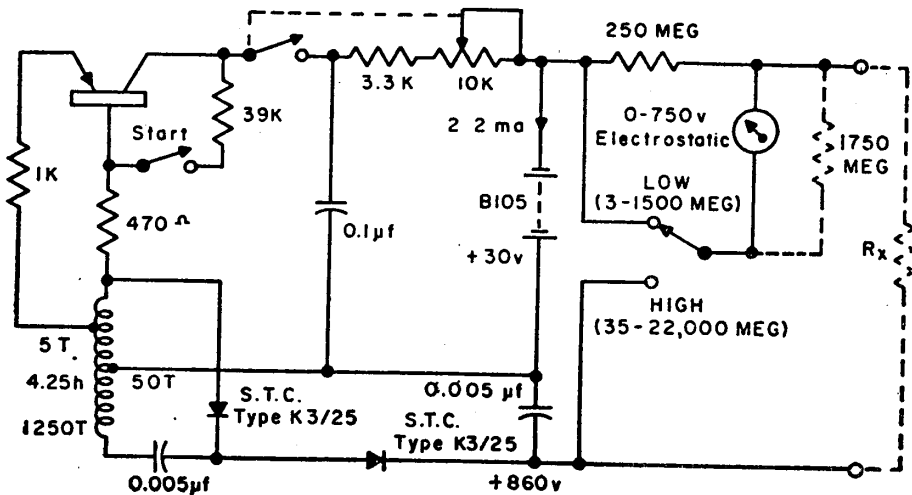



Fig. 15-56 – Megaohmetro.

(dal « Wireless World » - Marzo 1954)

Fig. 15-57 – Misuratore di capacità da 1 a 1000 pF in 2 gamme.

(dal « Radio Television News » - Maggio 1956)

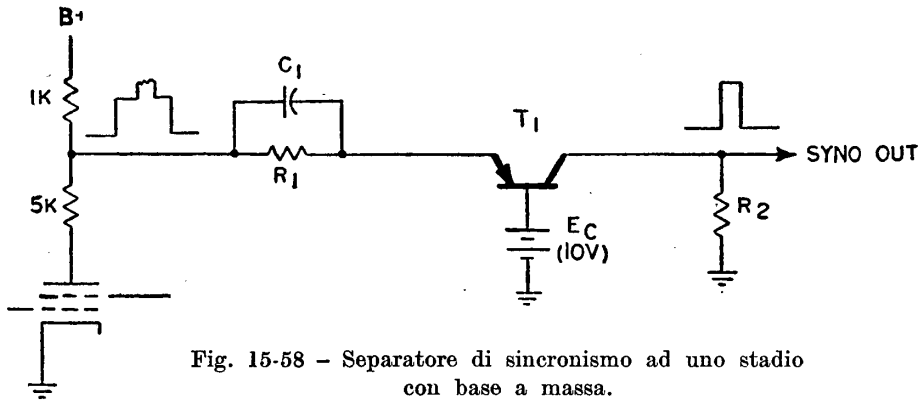



Fig. 15-58 – Separatore di sincronismo ad uno stadio con base a massa.

(dal « Transistors I » - R.C.A. Laboratories)

APPENDICE

Questa Appendice ha lo scopo di fornire al lettore una visione panoramica dei prodotti a semiconduttori attualmente esistenti in commercio, di costruzione sia europea che americana.

Nelle varie tabelle sono stati riportati i dati e le caratteristiche elettriche essenziali, desumendole dai cataloghi editi dai singoli fabbricanti. I dati che compaiono, aggiornati al marzo 1957, rappresentano i valori nominali, e si riferiscono tutti ad una temperatura ambiente di 25°C, salvo notazione contraria.

Le tabelle sono sette e precisamente:

Tabella 1 – Transistori di bassa potenza.
Tabella 2 – Transistori per alta frequenza.
Tabella 3 – Transistori di potenza.
Tabella 4 – Tetrodi transistori N P N.
Tabella 5 – Fototransistori.
Tabella 6 – Diodi.
Tabella 7 – Raddrizzatori di potenza.

In ogni tabella i vari tipi sono raggruppati per costruttore in ordine alfabetico.

Si noteranno alcuni casi in cui le stesse caratteristiche corrispondono a sigle diverse, mentre in qualche altro caso la medesima sigla corrisponde allo stesso tipo.

Ciò è dovuto alla mancanza di una normalizzazione universale, per altro già in corso di studio negli Stati Uniti, e di prossima attuazione.

Nelle prime cinque tabelle, che riguardano i transistori, i simboli e le abbreviazioni usate hanno il seguente significato:

α = Guadagno di corrente;
β = Fattore di amplificazione;
C_c = Capacità del collettore;
$f_{\alpha co}$ = Frequenza di taglio;
b. a m. = Connessione con base a massa;
e. a m. = Connessione con emettitore a massa;
c. a m. = Connessione con collettore a massa;
I_b = Corrente di base;
I_{b2} = Corrente della seconda base (per i soli tetrodi);
I_c = Corrente del collettore;
I_{co} = Corrente di taglio per il collettore;
I_ε = Corrente dell'emettitore;
$I_{\varepsilon o}$ = Corrente di taglio per l'emettitore;
NF = Figura di rumore;
r_b = Resistenza di base;
r_c = Resistenza di collettore;
r_ε = Resistenza di emettitore;
R_g = Resistenza del generatore;
R_i = Resistenza d'ingresso;
R_c = Resistenza di carico;
R_u = Resistenza d'uscita;
V_c = Tensione al collettore.

Tabella 1 – **Transistori di bassa potenza.**

Costruttore	Sigla	Tipo	Potenza massima dissipabile al collettore	Massima tensione al collettore	Massima corrente al collettore	Massima temperatura ambiente	Parametri in bassa frequenza con piccoli segnali										Connessione con emettitore a massa					Connessione con base a massa				Connessione con collettore a massa			
			(mW)	(V)	(ma)	(°C)	Polarizzazione V_c (V)	Polarizzazione I_ε (ma)	β	r_ε (ohm)	r_b (ohm)	r_c (megaohm)	$f\alpha_{co}$ (mc)	C_c (pF)	I_{co} (μa)	NF (db)	I_b (ma)	R_i (ohm)	R_c (ohm)	R_g (ohm)	guadagno (db)	R_i (ohm)	R_c (ohm)	R_g (ohm)	guadagno (db)	R_i (ohm)	R_c (ohm)	R_g (ohm)	guadagno (db)
Amperex Electronic Corp. 230 Duffy Ave. Hicksville, N. Y.	OC70	*p-n-p*	25 (45C)	— 10	— 10	45	— 2	0,5	30	39	1000	1,43			— 8	10													
	OC71	*p-n-p*	25 (45C)	— 10	— 10	45	— 2	3	47	6,5	500	0,625			— 8	10													
CBS-Hytron Danvers, Mass.	2N36	*p-n-p*	50	— 20	— 8	50	— 6	1	45	30	450	0,95	0,5						30 000	1000	40								
	2N37	*p-n-p*	50	— 20	— 8	50	— 6	1	30	30	350	0,55	0,5						30 000	1000	36								
	2N38	*p-n-p*	50	— 20	— 8	50	— 6	1	15	25	350	0,5	0,5						30 000	1000	32								
	2N180	*p-n-p*	150	— 30	— 15	75	— 6	1	60	32	1000		0,6	25		12	0,25	1500	20 000		43								
	2N181	*p-n-p*	250	— 30	— 20	75	— 6	1	60	32	500		0,6	25		12	0,3	1500	20 000		43								
	HA-1	*p-n-p*	50	— 20	— 8	50	— 3	0,5	40	24	700	1,7			— 12	12			30 000	1000	30								
	HA-2	*p-n-p*	50	— 20	— 8	50	— 3	0,5	30	35	350	0,8			— 12	27			30 000	1000	30								
	HA-3	*p-n-p*	50	— 20	— 8	50	— 3	0,5	35	30	450	0,6							1 200	1000	35								
	HC-1	*p-n-p*	50	— 20	— 8	50	— 6	1	45	30	450	0,95	0,7		— 12				30 000	1000	40								
Germanium Prod. Corp. 26 Cornelison Ave. Jersey City, N. J.	NPN-3/ 2N103	*n-p-n*	50 (25C)	35	10	75	4,5	— 1	4	25	100	2,0	0,75	20	5	22	0,25	225	100 000	adattata	33	45	250 000	adattata	30	2 500	500	adattata	7
	RD2517A/ 2N97	*n-p-n*	50 (25C)	30	10	75	4,5	— 1	13,3	25	100	3,0	1,0	19	2	20	0,07	400	100 000	adattata	38	35	250 000	adattata	32	7 000	500	adattata	11
	RD2518A/ 2N97A	*n-p-n*	50 (25C)	40	10	85	4,5	— 1	13,3	25	100	10,0	1,0	19	2	15	0,07	400	100 000	adattata	38	35	250 000	adattata	32	7 000	500	adattata	11
	RD2521A/ 2N98	*n-p-n*	50 (25C)	40	10	75	4,5	— 1	40	25	150	5,0	2,5	14	2	20	0,025	850	100 000	adattata	47	35	250 000	adattata	35	20 000	500	adattata	15
	RD2522A/ 2N98A	*n-p-n*	50 (25C)	40	10	85	4,5	— 1	40	25	150	10,0	2,5	14	2	15	0,025	850	100 000	adattata	47	35	250 000	adattata	35	20 000	500	adattata	15
	RD2523A/ 2N99	*n-p-n*	50 (25C)	40	10	75	4,5	— 1	40	25	150	5,0	3,5	10	2	15	0,025	850	100 000	adattata	47	35	250 000	adattata	35	20 000	500	adattata	15
	RD2525A/ 2N100	*n-p-n*	25 (25C)	25	5	50	4,5	— 1	140	25	400	5,0	5,0	14	2	20	0,007	3500	100 000	adattata	53	45	250 000	adattata	35	70 000	500	adattata	20
General Eletric Co. Electronics Park Syracuse, N. Y.	2N43	*p-n-p*	150 (25C)	— 45	— 50	100	— 5	1	49	32	400	1,0	1,0	40	— 10	22		1000	30 000	600	39	60	50 000	100	28	30 000	600	30 000	15
	2N44	*p-n-p*	150 (25C)	— 45	— 50	100	— 5	1	21,2	26,5	300	1,0	1.0	40	— 10	22		700	30 000	600	38	55	50 000	100	28	15 000	600	15 000	12
	2N45	*p-n-p*	150 (25C)	— 45	— 50	100	— 5	1	11,5	20	250	1,0	1,0	40	— 10	22		450	30 000	600	36	50	50 000	100	28	7 500	600	7 500	11
	2N43A	*p-n-p*	150 (25C)	— 45	— 50	100	— 5	1	43,4	15	575	1,43	1,0	40	— 5	10		1000	30 000	600	39	60	50 000	100	28	30 000	600	30 000	15
	2N43A USAF	*p-n-p*	150 (25C)	— 45	— 50	100	— 5	1	43,4	15	575	1,43	1,0	40	— 5	30		1000	30 000	600	39	60	50 000	100	28	30 000	600	30 000	15
	2N76	*p-n-p*	50 (25C)	— 20	— 10	60	— 5	1	19	17	300	1,0	1,0	40	— 5	18		1000	30 000	600	38	55	50 000	100	28	15 000	600	15 000	12
General Transistor Corp. 95-18 Sutphin Blvd Jamaica, N. Y.	GT-14	*p-n-p*	70 (50C)	— 25		85	— 4,5	1	28	30	800	1,5	0,65		— 10	16													
	GT-20	*p-n-p*	70 (50C)	— 25		85			45	30	800	1,5	0,65		— 10	16													
	GT-34	*p-n-p*	70 (50C)	— 25		85			15	30	800	1,5	0,65		— 10	16													
	GT-81	*p-n-p*	70 (50C)	— 25		85			65	30	800	1,5	0,65		— 10	16													
	GT-83	*p-n-p*	70 (50C)	— 25		85			45	30	800	1,5	0,70		— 10	16													
	GT-87	*p-n-p*	70 (50C)	— 25		85			28	30	800	1,5	0,50		— 10	16													
	GT-88	*p-n-p*	70 (50C)	— 25		85			65	30	800	1,5	1,0		— 10	16													
	2N34	*p-n-p*	70 (50C)	— 25		85	— 4,5	1	40	30	350	2,0			— 15	24													
	2N36	*p-n-p*	70 (50C)	— 25		85	— 4,5	1	45	30	850	2,0			— 15	24													
	2N37	*p-n-p*	70 (50C)	— 25		85	— 4,5	1	30	30	600	2,0			— 15	24													
	2N38	*p-n-p*	70 (50C)	— 25		85	— 4,5	1	15	30	400	2,0			— 15	24													
	2N39	*p-n-p*	70 (50C)	— 25		85	— 4,5	1	45	30	850	2,0			— 15	24													
	2N40	*p-n-p*	70 (50C)	— 25		85	— 4,5	1	28	30	600	2,0			— 15	24													
	2N42	*p-n-p*	70 (50C)	— 25		85	— 4,5	1	13	30	400	2,0			— 15	24													
Hughes Aircraft Co. Culver City, Calif.	HA5001	*n-p-n*	500 (25C)	30	100	85	5	1	65,6	16,5	900	2	2,5	15	5														
	HA5002	*n-p-n*	500 (25C)	20	100	85	5	1	27,5	16	400	1	0,8		12	15													
	HA5003	*n-p-n*	500 (25C)	20	100	85	5	1	99	26	400	1	1,5		10	15													
Hydro-Aire Inc. Burbank, Calif.	J-1	*p-n-p*	150 (25C)	— 40	— 10	50	— 6	1	34	30	400	1,0	1,0		— 10	11					40								
	J-2	*p-n-p*	150 (25C)	— 40	— 10	50	— 6	1	15	30	300	0,7	0,5		— 15	22					35								
	J-3	*p-n-p*	150 (25C)	— 40	— 10	50	— 6	1	9	30	300	0,5	0,5		— 20	33					30								
	HA-1	*p-n-p*	100 (25C)	— 20	— 10	50	— 6	1	40	30	350	0,75			— 10	20													
	CQ-1	*p-n-p*	150 (25C)	— 40	— 10	50	— 6	1	9	30	200	0,5	0,5		— 20	33													
Nat'l Union Electric 350 Scotland Rd. Orange, N. J.	2N39	*p-n-p*	47 (25C)	— 27	— 12	60	— 4,5	1	32,4			1 ÷ 2			— 10	20			30 000	500	39								
	2N40	*p-n-p*	47 (25C)	— 27	— 12	60	— 4,5	1	15,7-32,4			1 ÷ 2			— 10	24			30 000	500	38								
	2N42	*p-n-p*	47 (25C)	— 18	— 12	60	— 4,5	1	9			0,5 ÷ 2			— 20	28			30 000	500	36								
	T34D	*p-n-p*	56 (25C)	— 27	— 12	70	— 4,5	1	32,4	20		1 ÷ 2			— 10	20			30 000	500	39								
	T34E	*p-n-p*	56 (25C)	— 27	— 12	70	— 4,5	1	15,7-32,4	20		1 ÷ 2			— 10	24			30 000	500	38								
	T34F	*p-n-p*	56 (25C)	— 18	— 12	70	— 4,5	1	9	20		0,5 ÷ 2			— 20	28			30 000	500	36								
Philco Corp. 4700 Wissahickon Ave. Philadelphia, Pa.	2N47	*p-n-p*	50 (25C)	— 35	— 20		— 5	1	39	25	600	1,0	1,0	49	— 10	15		1000	50 000	adattata	42								
	2N49	*p-n-p*	50 (25C)	— 35	— 20		— 5	1	39	25	600	1,0	1,0	49	— 10	12		1000	50 000	adattata	42								

Costruttore	Sigla	Tipo	Potenza massima dissipabile al collettore	Massima tensione al collettore	Massima corrente al collettore	Massima temperatura ambiente	Parametri in bassa frequenza con piccoli segnali										Connessione con emettitore a massa					Connessione con base a massa				Connessione con collettore a massa			
			(mW)	(V)	(ma)	(°C)	Polarizzazione V_c (V)	Polarizzazione I_ε (ma)	β	r_ε (ohm)	r_b (ohm)	r_c (megaohm)	$f_{\alpha co}$ (mc)	C_c (pF)	I_{co} (μa)	NF (db)	I_b (ma)	R_i (ohm)	R_c (ohm)	R_g (ohm)	Guadagno (db)	R_i (ohm)	R_c (ohm)	R_g (ohm)	guadagno (db)	R_i (ohm)	R_c (ohm)	R_g (ohm)	guadagno (db)
Philips	OC70	p-n-p	25	— 10	— 10	45	— 2	0,5	30	39	1000	1,43	0,015		— 12	15		2200				71							
	OC71	p-n-p	25	— 10	— 10	45	— 2	3	47	6,5	500	0,625	0,01		— 12	10		800				17							
	2OC72	p-n-p	65	— 30	— 125	65	— 10	0					0,012		— 4,5	12													
	OC73	p-n-p	50	— 32	— 10	45	— 10	0,5					0,5		— 4,5	10													
	OC76	p-n-p	50	— 32	— 250	45	— 6	10					0,16		— 4,5														
RCA Harrison, N. J.	2N104	p-n-p	110 (25C)	— 30	50	85	— 6	1	44	24,5	750	2,25	0,7		— 10	12		1200	50 000	adattata	43	140	400 000	adattata	32,8	500 000	20 000	adattata	13,9
	2N77	p-n-p	35 (25C)	— 25	15	50	— 4	0,7	40	36	560	2,3	0,7		— 10	9		1350	50 000	adattata	42,6	130	400 000	adattata	33,2	10 000	300	adattata	16,2
Raytheon Mfg Co. 55 Chapel St. Newton, Mass.	CK721	p-n-p		— 15	— 10	70	— 6	1	45	25	700	2,0			— 6	22		1500	20 000	adattata	41	70	100 000	adattata	31	600 000	20 000	adattata	15
	CK722	p-n-p		— 22	— 10	70	— 6	1	22	25	250	2,0			— 6	25		500	20 000	adattata	36	45	100 000	adattata	32	200 000	20 000	adattata	10
	CK725	p-n-p		— 12	— 10	70	— 6	1	90	25	1500	2,0			— 6	20		2700	20 000	adattata	42	110	100 000	adattata	30	1 000 000	20 000	adattata	16
	CK727	p-n-p		— 6	— 10	70	— 1,5	0,5	35	50	500	2,0			— 6	12			20 000	1000	36		200 000	100	28	540 000	10 000	100 000	14
	2N63	p-n-p		— 22	— 10	85	— 6	1	22	25	350	2,0			— 6	25		800	20 000	adattata	39	50	100 000	adattata	32	350 000	20 000		13
	2N64	p-n-p		— 15	— 10	85	— 6	1	45	25	700	2,0			— 6	22		1500	20 000	adattata	41	70	100 000	adattata	31	600 000	20 000		15
	2N65	p-n-p		— 12	— 10	85	— 6	1	90	25	1500	2,0			— 6	20		2700	20 000	adattata	42	110	100 000	adattata	30	1 000 000	20 000		16
Siemens – Halske	TF65	p-n-p	10	— 10	— 10	50	— 1	2								18													
	TF70	n-p-n	200	30	25	50	5	— 1	10				0,25	20		25					30				20				
	TF71	n-p-n	200	60	25	50	5 ÷ 30	-1÷-01	24				0,4	20		20					35				20				
	TF72	n-p-n	100	60	25	50	5 ÷ 30	-1÷-10	99				0,5	20		25					40				30				
	TF75	p-n-p	250	— 13	— 250	50	— 6	— 10	30																				
Sylvania Electric 1740 Broadway New York, N. Y.	2N34	p-n-p	50 (25C)	— 40	— 10		— 6	1	40	26	800	2,0	0,6	15	— 5	18	— 0,03	1200	30 000	500	40					20 000	500		16
	2N35	n-p-n	50 (25C)	— 40	— 10		6	— 1	40	26	800	2,0	0,8	18	5	16	0,03	1200	30 000	500	40					20 000	500		16
Texas Instruments 6000 Lemmon Ave. Dallas, Texas	200	n-p-n	50 (25C)	30	5	50	5	— 1	9	22	150	0,4	0,9	15	10	26		480	20 000	500	37	35	100 000	60	30	9 500	500	15 000	12
	201	n-p-n	50 (25C)	30	5	50	5	— 1	19	22	170	0,4	1,1	17	10	23		970	20 000	500	40	40	100 000	60	30	15 500	500	15 000	14,5
	202	n-p-n	50 (25C)	30	5	50	5	— 1	49	35	200	0,4	1,3	19	10	20		1250	20 000	1250	43	45	100 000	60	31	32 000	500	15 000	17
	206S	n-p-n	50 (25C)	30	5	50	2,5	— 0,5	35						3	14			20 000	1000	32								
	207S	n-p-n	50 (25C)	30	5	50	2,5	— 0,5	19						3,5	21			20 000	1000	29								
	208S	n-p-n	50 (25C)	30	10	50	2,5	— 10	19						4	26			300	1000	26								
	300	p-n-p	50 (25C)	— 30	— 10	50	— 5	1	9		550	0,4			— 10	25													
	301	p-n-p	50 (25C)	— 30	— 10	50	— 5	1	19		1000	0,4			— 10	20													
	903	n-p-n	150 (25C)	30	10	150	5	— 1	9-19	150	500	0,5	3		1 (25C)	23													
	904	n-p-n	150 (25C)	30	10	150	5	— 1	19-39	150	1250	0,5	3		1 (25C)	23													
	905	n-p-n	150 (25C)	30	10	150	5	— 1	≧ 39	150	2500	0,5	3		1 (25C)	23													
	2N291	p-n-p	180 (25C)	— 25	— 200	85	— 9		45						— 10				500		33								
	210	n-p-n	50 (25C)	30	5	50	22,5	— 2							50 (25C)				10 000	500	39								
	302	p-n-p	50 (25C)	— 30	— 10	50	— 5	1	44						— 10														
	350		50 (25C)	— 12																									
Transitron 407 Main St. Melrose, Mass.	2N85	p-n-p	750	— 45	— 100	100	— 12	10	40	2,5	300	0,16	0,8		— 10	20			1 000	500	30								
	2N86	p-n-p	750	— 60	— 100	100	— 12	10	20	2,5	300	0,125	0,8		— 10	20			1 000	500	26								
	2N87	p-n-p	750	— 30	— 100	100	— 12	10	20	2,5	300	0,125	0,8		— 20	20			1 000	500	26								
	2N88	p-n-p	25	— 12	— 10	85	— 1,3	0,5	25	50	1000	0,5	0,5		— 10	10			20 000	1000	36								
	2N89	p-n-p	25	— 12	— 10	85	— 1,3	0,5	25	50	1000	2,0	0,5		— 10	20			20 000	1000	36								
	2N90	p-n-p	25	— 12	— 10	85	— 1,3	2,5	40	10	600	0,5	0,5		— 10	20			600	1000	26								
	2N91	p-n-p	125	— 15	— 500	85	— 3	30	25	1,5	50	2,0			— 15														
	2N92	p-n-p	125	— 25	— 200	85	— 3	5	30	5	500	1,0			— 10														
	2N34	p-n-p	125	— 25	— 20	100	— 6	1	40	18	600	1,0			— 10	20			30 000	1000	40								
	2N36	p-n-p	125	— 25	— 20	100	— 6	1	45	18	700	1,0			— 10	20			30 000	1000	40								
	2N37	p-n-p	125	— 25	— 20	100	— 6	1	30	20	500	1,0			— 15	22			30 000	1000	36								
	2N38	p-n-p	125	— 25	— 20	100	— 6	1	15	20	250	1,0			— 25	24			30 000	1000	32								
	2N43	p-n-p	375	— 45	— 50	100	— 6	1	33	20	500	1,0			— 15	20			30 000	1000	40								
	2N44	p-n-p	375	— 45	— 50	100	— 6	1	16	20	300	1,0			— 15	22			30 000	1000	37								
	2N45	p-n-p	375	— 45	— 50	100	— 6	1	9	20	250	1,0			— 15	22			30 000	1000	33								
	2N63	p-n-p	125	— 25	— 20	100	— 6	1	20	20	350	2,0			— 10	25			30 000	1000	38								
	2N64	p-n-p	125	— 25	— 20	100	— 6	1	30	20	700	2,0			— 10	22			30 000	1000	39								
	2N65	p-n-p	125	— 25	— 20	100	— 6	1	50	18	1500	2,0			— 10	20			30 000	1000	41								
Tung-Sol Electric 100 Eighth Ave. Newark, N. J.	DR126	p-n-p	50 (25C)	— 10		85	— 1,5	0,5	24	26	900	1,5	0,9		— 9	14	— 0,006		30 000	1000	33								
	DR128	p-n-p	50 (25C)	— 10		85	— 1,5	0,5	49	34	1400	2,0	0,9		— 8	18	— 1,5		300		24								
	DR129	p-n-p	50 (25C)	— 25		85	— 1,5	0,5	32,4	26	1200	2,0	0,7		— 10	18	— 0,006		30 000	1000	35								
	DR130	p-n-p	50 (25C)	— 25		85	— 1,5	0,5	13	20,5	650	1,3	0,5		— 14	21	— 0,006		30 000	1000	27								
	DR154	p-n-p	50 (25C)	— 25		85	— 1,5	0,5	124	55	600	1,2	0,7		— 10	18	— 0,006		30 000	1000	40								
Western Electric 120 Broadway New York, N. Y.	2N27	n-p-n	50 (60C)	30	5	85	4,5	— 1	19-198	50	700	2,0	2	17	10	30													
	2N28	n-p-n	50 (60C)	30	5	85	4,5	— 1	5-198	125	1000	1,0	0,95	25	10	30													
Westinghouse Box 284 Elmira, N. Y.	2N54	p-n-p	200 (25C)	— 45	— 10	60	— 6	1	33	25	400	1,0	0,5		— 6			700	50 000	700	39,5	125	300 000	125	31	35 000	1 000	35 000	15
	2N55	p-n-p	200 (25C)	— 45	— 10	60	— 6	1	20	20	400	1,0	0,5		— 6			550	67 000	550	39	125	300 000	125	31	27 000	1 000	27 000	13
	2N56	p-n-p	200 (25C)	— 45	— 10	60	— 6	1	13	5	400	1,0	0,5		— 6			450	85 000	450	37	125	300 000	125	31	20 000	1 000	20 000	11

Tabella 2 – Transistori per alta frequenza.

								Parametri in bassa frequenza con piccoli segnali											Parametri in alta frequenza	Condizioni circuitali per le alte frequenze					Caratteristiche di interruzione ad alte frequenze			
Costruttore	Sigla	Tipo	Massima potenza dissipabile al collettore (mW)	Massima tensione al collettore (V)	Massima corrente al collettore (ma)	Massima temperatura ambiente (°C)	Intervallo di temperatura (°C)	Polarizzazione V_c (V)	Polarizzazione I_E (ma)	β	r_E (ohm)	r_b (ohm)	r_c (megaohm)	$f_{\alpha co}$ (mc)	C_c (pF)	I_{co} (μa)	I_{Eo} (μa)	NF (db)	$r_b\ C_c$ (μμ sec.)	Impiego	R_i (ohm)	R_u (ohm)	Guadagno di potenza (db)	Circuito	Tempo di salita (μ sec.)	Tempo di caduta (μ sec.)	Tensione inversa all'emettitore (V)	Circuito
CBS - Hytron	2N182	n-p-n	100	25		75	— 50 ÷ 75	6	— 1	25	27	1000	2	> 2,5	10					r-f/mf amp.					0,7	0,5		
	2N183	n-p-n	100	25		75	— 50 ÷ 75	6	— 1	40	27	1500	2	> 5	10					interruttore					0,5	0,3		
	2N184	n-p-h	100	25		75	— 50 ÷ 75	6	— 1	60	27	2500	2	10	10					»					0,3	0,2		
General Electric	2N78	n-p-n	50 (30C)	15	20	100	100 max	5	— 1	27,5				5,5	6	1		14		r-f amp.	1 000	6 000	20					
																				m-f amp.	1 500	10 000	30					
	2N123	p-n-p	150 (25C)	— 15	150		85 »	— 5	1	30-150				7,5	14	— 2	5	10	1 000	interruttore					0,1	0.2	5	
	2N135	p-n-p	100 (25C)	— 20	— 50		85 »	— 5	1	20				4,5	14	5				rf/mf amp.			29					
	2N136	p-n-p	100 (25C)	— 20	— 50		85 »	— 5	1	40				6,5	14	5				»			31					
	2N137	p-n-p	100 (25C)	— 10	— 50		85 »	— 5	1	60				10	14	5				»			33					
General Transistor Corp.	GT-759	p-n-p	90 (25C)	— 20		70		— 4,5	1	20				2,5		— 1	5	16		r-f/mf amp.			24					
	GT-760	p-n-p	90 (25C)	— 15		70		— 4,5	1	40				5	14	— 1	5	16		»	500	20 000	28					
	GT-761	p-n-p	90 (25C)	— 12		70		— 4,5	1	75				10	14	— 1	5	16		»	500	20 000	32					
	GT-762	p-n-p	90 (25C)	— 6		70		— 4,5	1	100				20	14	— 1	5	16		»	500	20 000	34					
	GT-763	p-n-p	90 (25C)	— 6		70		— 4,5	1	120				30	14	— 1	5	16		»	500	20 000	35					
Germanium Prod.	RD2523A (2N99)	n-p-n	50 (25C)	40	10	75		5	— 1	40	25	150	5,0	3,5	10	2		15		m-f amp. (non neutralizzato)	500	10 000	22		<0,2	<0,3		
	RD2525A (2N100)	n-p-n	25 (25C)	25	5	50		5	— 1	100	25	400	5,0	5,0	14	2		20		»	750	10 000	23		<0,2	<0,3		
	RD2521A (2N98)	n-p-n	50 (25C)	40	10	75		5	— 1	40	25	150	5,0	2,0	14	2		20		»	500	10 000	22		<0,2	<0,3		
	RD2517A	n-p-n	50 (25C)	30	10	75		5	— 1	13	25	100	3,0	1,0	19	2		20		»	350	10 000	20		<0,2	<0,3		
Hydro-Aire	HF-1	p-n-p	35 (25C)	— 15	— 5	55		— 4,5	1	25	30	500	1,0	5,0	10	— 10												
	IF-1	p-n-p	35 (25C)	— 15	— 5	55		— 4,5	1	20	30	500	1,0	2,0	10	— 10												
Philco	SB-100		10 (40C)	— 4,5	— 5		— 55 ÷ 85	— 3	0,5	19	50		0,4	30 (osc.)	2,2	— 0,5	0,5		800									
Raytheon	CK-760	p-n-p		— 6	— 5		— 55 ÷ 85	— 6	1	45	22	70	1,0	5	14	— 2	2	25	1 000									
	CK-761	p-n-p		— 6	— 5		— 55 ÷ 85	— 6	1	50	22	70	1,0	10	14	— 2	2	25	1 000									
	CK-762	p-n-p		— 6	— 5		— 55 ÷ 85	— 6	1	60	22	70	1,0	20	14	— 2	2	25	1 000									
Sylvania	2N94	n-p-n	50 (25C)	20	10		— 55 ÷ 85	6	— 0,5	30	52	500	2,0	3,5	10	— 3	3	15	1 000	m-f (b. a massa)	80	100 000	25	C	0,15	0,15	≧0	F
																				m-f (e. a massa)	500	25 000	32	D				
	2N94A	n-p-n	50 (25C)	20	10		— 55 ÷ 85	6	— 0,5	30	52	500	2,0	6,0	10	— 3	— 3	15	1 200	m-f (b. a massa)	80	100 000	25	C	0,1	0,1	≧0	
																				m-f (e. a massa)	800	25 000	35	D				
																				r-f (b. a massa)	80	15 000	20	E				
Texas Inst.	220	n-p-n	50 (25C)	30	5	50		22,5								50				262-kc (e. a m.)	750	70 000	31	A				
	221	n-p-n	50 (25C)	30	5	50		22,5								50				»	750	70 000	33	A				
	222	n-p-n	50 (25C)	30	5	50		22,5								50				»	750	70 000	35	A				
	223	n-p-n	50 (25C)	30	5	50		22,5								50				262-kc conv.	300	60 000	20	B				
	904A	n-p-n	150 (25C)	30	10	150		5	— 1	≧19	150	1250	0,5	≧ 8		1												
	224–1																			neut. 262-kc	600	70 000	26	H				
	2																			m-f (e. a massa)			28					
	3																						30					
	4																						32					
	5																						34					
	225–1																			neut. 455-kc	500	50 000	24	H				
	2																			m-f (e. a massa)			26					
	3																						28					
	4																						30					
	5																						32					
	226–1																			neut. 262-kc	65	120 000	18	I				
	2																			m-f (b. a massa)			20					
	3																						22					
	4																						24					
	5																						26					
	227–1																			neut. 455-kc	65	150 000	18	I				
	2																			m-f (b. a massa)			20					
	3																						22					
	4																						24					
	5																						26					
	200A	n-p-n	150	30	50	75	— 55 ÷ 75	5	— 1	12				2,5	4,5	0,1		12			55							
	201A	n-p-n	150	30	50	75	— 55 ÷ 75	5	— 1	26				3	4,5	0,1		10			55							
	202A	n-p-n	150	30	50	75	— 55 ÷ 75	5	— 1	65				3.5	4,5	0,1		9			55							
	2N117	n-p-n	150	30	25	150	— 55 ÷150	5	— 1					4	7	0,1		20			42							
	2N118	n-p-n	150	30	25	150	— 55 ÷150	5	— 1					5	7	0,1		20			42							
	2N119	n-p-n	150	30	25	150	— 55 ÷150	5	— 1					5	7	0,1		20			42							
Tung-Sol	DR-155	p-n-p	50 (25C)	— 10		85	— 55 ÷ 85	— 1,5	0,5	32			1,0	1,4		— 15		28										
	2N112	p-n-p	50 (25C)	— 10	— 8	85	— 55 ÷ 85	— 6	1	32	31	110	1,2	5		— 10		28		m-f	600	25 000	32	G				
	2N113	p-n-p	50 (25C)	— 10	— 8	85	— 55 ÷ 85	— 6	1	32	31	110	1,2	10		— 10		28		m-f	600	25 000	33	G				
Western Electric	2N27	n-p-n	50 (60C)	30	5	85		4,5	— 1	20-198	50	700	2,0	2	17	10												

Tabella 3 – **Transistori di potenza.**

Costruttore	Sigla	Tipo	Massima potenza d'uscita (W): Classe A	Classe B (push-pull)	Interruttore per c. c.	Massima potenza dissipabile al collettore (W)	Massima tensione al collettore (V), Circuito: e. a m.	b. a m.	Massima corrente al collettore (amp.)	$f\alpha_{co}$ (kc)	Parametri in bassa frequenza con piccoli segnali, Polarizzazione: V_c (V)	I_E (ma)	β	r_E (ohm)	r_b (ohm)	r_c (ohm)	C_c (pF)	Tempo di salita (μ sec)	I_{co} (μa)
Amperex	2N115	p-n-p	1,5	2,5		2 (45C)	— 12 (B) — 6 (A)		— 1	300									
	2-OC72	p-n-p				0,045 (45C)	13 (B)		— 0,045	10									
C. B. S.	2N155	p-n-p	2			6,25		— 30	— 3										
	2N156	p-n-p	2			6,25		— 30	— 3										
	2N158	p-n-p	2			6,25		— 60	— 3										
	2N255	p-n-p	1			6,25		— 15	— 3										
	2N256	p-n-p	2			6,25		— 30	— 3										
Hydro-Aire	JP-1	p-n-p	0,45	0,9	1,5	0,5 (25C)		— 45	— 0,1	50	— 22,5	20	9	2	150	100 000			— 500
Minneapolis-Honeywell Regulator Co. 2753 4th Ave. S Minneapolis, Minn.	H-1	p-n-p	5	10	40	20 (21C)	— 30	— 60	— 0,8	20	— 2							1,5	— 8000
	2N57	p-n-p	6	12	48	20 (21C)	— 30	— 60	— 1	20	— 2							1,2	— 8000
	H-2	p-n-p	8,5	18	68	20 (21C)	— 30	— 60	— 1,4	20	— 2							0,5	— 8000
	H-3	p-n-p	2	4	16	5 (21C)	— 30	— 60	— 0,35	20	— 2							1,2	— 1000
	H-4	p-n-p	2	6	16	5 (21C)	— 30	— 60	— 0,5	20	— 2							0,6	— 1000
Sylvania	2N68	p-n-p	0,75	10		4 (25C)		— 25	— 1,5		— 6	50	40	1	30	100 000	300		— 100
	2N95	n-p-n	0,75	10		4 (25C)		25	1,5		6	— 50	40	1	30	100 000	300		100
	2N101	p-n-p		elettricamente uguale al 2N68															
	2N102	n-p-n		elettricamente uguale al 2N95															
Texas Inst.	X-2	n-p-n						35	0,075	225	5	— 1	9	25	0,75	200 000			25
	951	n-p-n (silicio)		0,45 (25C) 0,3 (100C) 0,15 (150C)		1 (25C) 0,5 (100C) 0,15 (150C)	50		0,06										5
	952	n-p-n (silicio)		0,6 (25C) 0,4 (100C) 0,15 (150C)		1 (25C) 0,5 (100C) 0,15 (150C)	80		0,05										6
	953	n-p-n (silicio)		1 (25C) 0,5 (100C) 0,15 (150C)		1 (25C) 0,5 (100C) 0,14 (150C)	120		0,04										8
Transistor Products 241-251 Crescent Ave. Waltham, Mass.	X-107	p-n-p	1			2 (25C)	— 30	— 60	— 1		— 24	80	22	0,85	12	50 000			— 120
	X-120	p-n-p	7,5			15 (25C)	— 30	— 60	— 4		— 28	360	20	0,65	1	10 000			— 200
Transitron	2N83	p-n-p	5	15	40	10 (25C)	— 30	— 45	— 1	200	— 20	100	8	0,3	15	20 000	400	1,5	— 100
	2N84	p-n-p	5	10	30	10 (25C)	— 22	— 30	— 1	200	— 20	100	12	0,3	15	20 000	400	1,5	— 100
Tung-Sol	DR-150	p-n-p		1	3,5	5 (25C)		— 25	— 1	250	— 15	10	33			30 000			
Western Electric	2N66	p-n-p				5 (25C)	— 40	— 60	— 0,8	500	— 4,5 — 40	100 0	45				400		75 300

Costruttore	Sigla	Condizioni di funzionamento normale: Classe e circuito	Tensione di alimentazione (V)	Corrente al collettore (ma)	Corrente di base (ma)	Corrente in assenza di segnale (ma)	Potenza d'uscita (W)	Guadagno di potenza (db)	Potenza di pilotaggio (mW)	R_u (ohm)	R_c (ohm)	R_g (ohm)
Amperex	2N115	B (e. a m.)	— 6	— 1280		— 5	5	27				
	2-OC72	B (e. a m.)	— 6				0,2	27				
C. B. S.	2N155	A (e. a m.)	— 14	— 360			2	33	1		30	
	2N156	A (e. a m.)	— 14	— 360			2	33	1		30	
	2N158	A (e. a m.)	— 28	— 180			2	36	0,5		120	
	2N255	A (e. a m.)	— 7	— 500			1	19 ÷ 26	2 ÷ 10		14	
	2N256	A (e. a m.)	— 14	— 500			2	22 ÷ 29	2 ÷ 10		28	
Hydro-Aire	JP-1	B (b. a m.)	— 22,5	— 40			0,7	20				
Minneapolis-Honeywell Regulator Co.	H-1	A (e. a m.)	— 28	400	50		5	15	158	20	70	4
		B (e. a m.)	— 28	510		4	10	12	630	100	140	4
	2N57	A (e. a m.)	— 28	500	45		6,25	16	156	35	56	4
		B (e. a m.)	— 28	640		4	12,5	13	625	140	128	4
	H-2	A (e. a m.)	— 28	600	30		7,5	20	75	40	47	4
		B (e. a m.)	— 28	890		4	17,5	16	440	100	80	4
	H-3	A (e. a m.)	— 28	150	15		1,9	16	48	100	187	4
		B (e. a m.)	— 28	220		0,5	4,4	12	278	240	320	4
	H-4	A (e. a m.)	— 28	150	10		1,9	21	15	60	187	4
		B (e. a m.)	— 28	318		0,5	6,25	14	250	200	224	4
Sylvania	2N68	A (b. a m.)	— 12	— 150			0,6	23		75	100	50
		B (e. a m.)	— 12	— 550		— 1	5	15		50	12	50
		B (c. a m.)	— 12	— 550		— 1	5	10		250	12	100
		B (b. a m.)	— 24	— 950		— 1	10	10		2	24	2
	2N95	A (b. a m.)	12	150			0,6	23		75	100	
		B (e. a m.)	12	550		1	5	15		50	12	
		B (c. a m.)	12	550		1	5	10		250	12	
		B (b. a m.)	24	950		1	10	10		2	24	
Texas Inst.	X-2	B (b. a m.)	22,5	40			0,5	9,5			1000	
		B (b. a m.)	22,5	40			0,5	22,7			1000	
	951	B (e. a m.)	28	30			0,45 (25C) 0,15 (150C)	20			1500	1000
	952	B (e. a m.)	45	25			0,6 (25C) 0,15 (150C)	21			4000	1000
	953	B (e. a m.)	67,5	20			1 (25C) 0,15 (150C)	23			8000	1000
Transistor Products	X-107	A (b. a m.)	— 28	— 80			1	24	4	1,5	375	
	X-120	A (b. a m.)	— 28	— 360			5	20	50	0,8	100	
Transitron	2N83	B (e. a m.)	— 30	— 160			2,5	24			600	100
	2N84	B (e. a m.)	— 20	— 160			2,0	22			400	100
Tung-Sol	DR-150											
Western Electric	2N66											

Tabella 4 – Tetrodi transistori NPN.

Costruttore	Sigla	Massima potenza dissipabile al collettore (mW)	Massima tensione al collettore (V)	Massima corrente al collettore (ma)	Massima corrente fra le due basi (ma)	Impiego	Parametri in bassa frequenza con piccoli segnali – Polarizzazione V_c (V)	Polarizzazione I_E (ma)	I_{b2} (ma)	α	r_E (ohm)	r_b (ohm)	r_c (mega ohm)	I_{co} (μa)	Funzionamento normale – Frequenza (mc) circuito J	Guadagno di potenza a 5 mc circuito K
Germanium Prod.	RDX-302/ 3N23	50 (25C)	30	5	5	video amp, interruttore 10-mc osc	4,5	1	0	0,95	30	70	2	10	10 ÷ 20	12
	RDX-301/ 3N23A	50 (25C)	30	5	5	video amp, interruttore 20-mc osc	4,5	1	0	0,97	30	100	2	10	20 ÷ 35	14
	RDX-300/ 3N23B	50 (25C)	30	5	5	video amp, interruttore 35-mc osc	4,5	1	0	0,98	30	200	2	10	35 ÷ 50	15
	RDX-300A/ 3N23C	50 (25C)	30	5	5	video amp, interruttore 50-mc osc, 20 ÷ 30 mc mf	4,5	1	0	0,99	30	300	2	10	50 ÷ 80	17
Texas Inst.	700	50 (25C)	30	5	5	basso livello - bassa freq.	5	— 1	0	0,95	30	1000	1	10		
Western Eletric	3N22	30 (25C)	12	5	5	video amp, r-f	9 9	— 2 — 2	— 4,5 0	0,90 0,975	25 25	100 1000	1 1	10	15	

Tabella 5 – Fototransistori.

Costruttore	Sigla	Tipo	Massima tensione al collettore (V)	Massima corrente al collettore (ma)	Massima potenza dissipabile al collettore (mW)	Massima corrente in assenza di segnale (μa)	Massima temperatura ambiente (°C)	Frequenza di taglio (mc)	Disturbo	Sensibilità
General Transistor	GT-66	3 terminali	12	20	50 (25C)	15		750	6×10^{-5}	25 (μa/candela-piede)
Siemens-Halske	TP50	2 terminali	100		50	3,5	50			30 ma/lumen
Texas Inst.	800	2 terminali	20	20	50 (25C)	250	40	20		35 μa/candela-piede
Transistor Prod.	1N188	2 terminali	100		40 (25C)		50		3 ÷ 10 μv	10 μa/millilumen
	1N189	2 terminali			30 (25C)	20	50			0,08 %/candela-piede
	10A	2 terminali	15		100 (25C)	500	50		15 ÷ 100 μv	4ma per 300 candele-piede
	10B	2 terminali	15		100 (25C)	50	50		15 ÷ 100 μv	50 % per 10 candele-piede
	5B	2 terminali	50		100 (25C)	20	50		3 ÷ 10 μv	1ma per 300 caldele-piede
	5C	2 terminali	50		100 (25C)	5	50		3 ÷ 10 μv	50 % per 40 candele-piede
	11A	2 terminali	15		50 (25C)	4 000 ohms	50			2 000 ohm per 300 candele piede
	11B	2 terminali	15		50 (25C)	4000 ohms	50			3000 ohm per 300 candele-piede
	17A	2 terminali							< 1 μv	
Western Electric	1N85	2 terminali	90	1	50	20	85	25	2×10^{-6} μa	0,35 μa/μw

Circuiti riferiti alle tabelle dei transistori.

Circuiti riferiti alle tabelle dei transistori.

Tabella 6 – Diodi.

Costruttore	Sigla	Tipo	Tensione inversa di picco (V)	Corrente inversa massima (µA)	Corrente diretta massima di picco (mA)	Limiti di temperatura (°C)	Capacità (pF)	Sovraccarichi istantanei (mA) (per 1 µsec)	Corrente diretta per polarizzazione continua di 1V (mA)
C. B. S.	1N34	c.p. al Ge	75	500	150	— 55 + 75		500	5
	1N34A	»	75	500	150	— 55 + 75		500	5
	1N35	»	75		150	— 55 + 75		500	7,5
	1N38A	»	120	500	150	— 55 + 75		500	4
	1N39A	»	225	800	150	— 55 + 75		200	5
	1N40	»	75	850	150	— 55 + 75		500	
	1N42	»	125	625	150	— 55 + 75		500	
	1N48	»	85		150	— 55 + 75		400	4
	1N51	»	50		150	— 55 + 75		300	2,5
	1N52	»	85		150	— 55 + 75		400	4
	1N54	»	50		150	— 55 + 75		500	5
	1N54A	»	75	60	150	— 55 + 75		500	5
	1N55A	»	170	500	150	— 55 + 75		500	4
	1N55B	»	190		150	— 55 + 75		500	5
	1N56A	»	50		200	— 55 + 75		1000	15
	1N58A	»	120		150	— 55 + 75		500	5
	1N60	»	30	67	150	— 55 + 75		500	3
	1N63	»	125		150	— 55 + 75		400	4
	1N64	»	20	200		— 55 + 75			
	1N65	»	85		150	— 55 + 75		400	2,5
	1N67A	»	100	50	100	— 55 + 75		500	4
	1N68A	»	130		100	— 55 + 75		500	3
	1N69	»	75	500	125	— 55 + 75		400	5
	1N70	»	125	300	90	— 55 + 75		350	3
	1N71	»	50		200	— 55 + 75		1000	15
	1N73	»	75		60	— 55 + 75		100	
	1N74	»	75		60	— 55 + 75		100	
	1N75	»	125		150	— 55 + 75		400	2,5
	1N81	»	50		90	— 55 + 75		350	3
	1N82	c.p. al Si				— 55 +150			
	1N82A	»				— 55 +150			
	1N90	c.p. al Ge	75		150	— 55 + 75		500	5
	1N111	»	70	125	150	— 55 + 75		500	5
	1N112	»	70	250	150	— 55 + 75		500	5
	1N113	»	70	125	150	— 55 + 75		500	2,5
	1N114	»	70	250	150	— 55 + 75		500	2,5
	1N115	»	70	500	150	— 55 + 75		500	2,5
	1N119	»	75	125	150	— 55 + 75		500	5
	1N120	»	75	250	150	— 55 + 75		500	5
	1N126	»	75	300	90	— 55 + 75		350	5
	1N127	»	125	200	90	— 55 + 75		300	3
	1N128	»	50		90	— 55 + 75		300	3
	1N198	»	100	40	90	— 55 + 75		300	4
	1N497	giunz. al Ge	25		250	— 55 + 75			100
	1N498	»	50		250	— 55 + 75			100
	1N499	»	65		250	— 55 + 75			100
	1N500	»	75		250	— 55 + 75			100
	1N501	»	100		250	— 55 + 75			100
	1N502	»	125		250	— 55 + 75			100
C. F. T. H.	1N63	c.p. al Ge	100	50	150		0,8	400	4
	1N75	»	100	50	150		0,8	400	2,5
	1N70	»	100	300	90		0,8	350	3
	1N69	»	60	850	120		0,8	400	5
	1N81	»	40	10	90		0,8	350	3
	1N52	»	70	150	150		0,8	400	4
	1N65	»	70	200	150		0,8	400	2,5
	1N48	»	70	833	150		0,8	400	4
	1N51	»	40	1667	75		0,8	300	2,5

segue

seguito Tabella 6

Costruttore	Sigla	Tipo	Tensione inversa di picco (V)	Corrente inversa massima (μA)	Corrente diretta massima di picco (mA)	Limiti di temperatura (°C)	Capacità (pF)	Sovraccarichi istantanei (mA) (per 1 μsec)	Corrente diretta per polarizzazione continua di 1V (mA)
C. F. T. H.	TH8000	Gold	30	20	300		0,8	750	80
	TH8001	bonded	70	50	250		0,8	750	40
	1N143	al Ge	100	100	250		0,8	750	40
	TH8004	»	150	150	150		0,8	500	20
	TH8002	»	70	100	150		0,8	500	20
	1N64	c.p. al Ge	20	25					0,05 (a +0,25V)
	TH8010	»	15	25	300				100
	TH8020	»	75	125	150				5
	TH8101	»	10	100					100
	TH8102	»	10	500					10
	THP7	c.p. al Si	200	0,5	100	— 50 +150			1
	THP8	»	150	0,5	120	— 50 +150			2
	THP9	»	100	0,5	120	— 50 +150			3
	THP10	»	50	0,5	150	— 50 +150			4
	THP21	»	30	0,5	100	— 50 +150			1
	THP11	»	10	0,5	100	— 50 +150			1
	THP12	»	10	0,5	180	— 50 +150			10
Gahagan	1N34	c.p. al Ge	60	800					5
	1N34A	»	60	500					5
	1N35	»	50	10					7,5
	1N38	»	100	625					5
	1N38A	»	100	500					5
	1N39	»	200	800					5
	1N48	»	70	800					5
	1N52	»	70	150					5
	1N54	»	35	10					5
	1N54A	»	50	100					5
	1N55	»	150	800					5
	1N55B	»	150	500					5
	1N56A	»	40	300					15
	1N58A	»	100	600					5
	1N63	»	100	50					5
	1N65	»	70	200					5
	1N67A	»	80	50					5
	1N68A	»	100	625					5
	1N88	»	100	100					5
	1N89	»	80	100					5
	1N96	»	60	500					20
	1N97	»	80	100					10
	1N98	»	80	100					20
	1N99	»	80	50					10
	1N100	»	80	50					20
	1N117	»	60	100					10
	1N118	»	60	100					20
	1N127	»	100	300					5
	1N140	»	70	300					40
	1N141	»	70	50					20
	1N142	»	100	100					5
	1N143	»	100	100					40
	1N198	»	50	250					5
	1N270	»	50	100					200
	1N273	»	30	20					100
	1N277	»	100	500					5
	1N278	»	50	125					20
	1N279	»	30	200					100
	1N447	»	30	60					25
	1N448	»	100	100					25
	1N449	»	30	30					50

segue

seguito Tabella 6

Costruttore	Sigla	Tipo	Tensione inversa di picco (V)	Corrente inversa massima (μA)	Corrente diretta massima di picco (mA)	Limiti di temperatura (°C)	Capacità (pF)	Sovraccarichi istantanei (mA) (per 1 μsec)	Corrente diretta per polarizzazione continua di 1V (mA)
Gahagan	1N450	c.p. al Ge	100	100					50
	1N451	»	150	150					50
	1N452	»	30	30					100
	1N453	»	100	100					100
	1N454	»	50	50					200
	1N455	»	30	30					300
Hughes	1N55B	c.p. al Ge	150	500	90	— 78 + 90	0,5	1000	5
	1N67A	»	80	50	90	— 78 + 90	0,5	1000	4
	1N68A	»	100	625	90	— 78 + 90	0,5	1000	3
	1N89	»	80	100	90	— 78 + 90	0,5	1000	3,5
	1N90	»	60	500	90	— 78 + 90	0,5	1000	5
	1N95	»	60	500	90	— 78 + 90	0,5	1000	10
	1N96	»	60	500	90	— 78 + 90	0,5	1000	20
	1N97	»	80	100	90	— 78 + 90	0,5	1000	10
	1N98	»	80	100	90	— 78 + 90	0,5	1000	20
	1N99	»	80	50	90	— 78 + 90	0,5	1000	10
	1N100	»	80	50	90	— 78 + 90	0,5	1000	20
	1N116	»	60	100	90	— 78 + 90	0,5	1000	5
	1N117	»	60	100	90	— 78 + 90	0,5	1000	10
	1N118	»	60	100	90	— 78 + 90	0,5	1000	20
	1N126	»	60	850	90	— 78 + 90	0,5	1000	5
	1N127	»	100	300	90	— 78 + 90	0,5	1000	3
	1N128	»	40	10	90	— 78 + 90	0,5	1000	3
	1N191	»	90		90	— 78 + 90	0,5	1000	5
	1N192	»	70		90	— 78 + 90	0,5	1000	5
	1N198	»	80	50	90	— 55 + 90	0,5	1000	4
	1N456	giunzione	30	0,025	270	— 80 +200	10	1200	40
	1N457	al Si	70	0,025	225	— 80 +200	8	1000	20
	1N458	»	150	0,025	165	— 80 +200	6	800	7
	1N459	»	200	0,025	120	— 80 +200	4	700	3
	1N461	»	30	0,5	180	— 80 +200	10	900	15
	1N462	»	70	0,5	150	— 80 +200	8	800	5
	1N463	»	200	0,5	100	— 80 +200	4	700	1
	1N464	»	150	0,5	120	— 80 +200	6	700	3
Pacific Semiconductors Inc.	1N34A	c.p. al Ge	60	500	125	— 78 + 90	0,35		5
	1N38A	»	100	500	125	— 78 + 90	0,35		4
	1N63	»	100	50	125	— 78 + 90	0,35		4
	1N67A	»	80	50	125	— 78 + 90	0,35		4
	1N89	»	80	100	125	— 78 + 90	0,35		3,5
	1N95	»	60	500	125	— 78 + 90	0,35		10
	1N96	»	60	500	125	— 78 + 90	0,35		20
	1N97	»	80	100	125	— 78 + 90	0,35		10
	1N98	»	80	100	125	— 78 + 90	0,35		20
	1N100	»	80	50	125	— 78 + 90	0,35		20
	1N116	»	60	100	125	— 78 + 90	0,35		5
	1N117	»	60	100	125	— 78 + 90	0,35		10
	1N118	»	60	100	125	— 78 + 90	0,35		20
	1N126	»	60	850	125	— 78 + 90	0,35		5
	1N127	»	100	300	125	— 78 + 90	0,35		3
	1N128	»	40	10	125	— 78 + 90	0,35		3
	1N191	»	90		125	— 78 + 90	0,35		5
	1N192	»	70		125	— 78 + 90	0,35		5
	1N198	»	80	50	125	— 78 + 90	0,35		4
	PS208	»	60	120	125	— 78 + 90	0,35		
	PS210	»	100	100	125	— 78 + 90	0,35		15
	PS211	»	60	50	125	— 78 + 90	0,35		30
	PS214	»	60	200	125	— 78 + 90	0,35		5

segue

seguito Tabella 6

Costruttore	Sigla	Tipo	Tensione inversa di picco (V)	Corrente inversa massima (μA)	Corrente diretta massima di picco (mA)	Limiti di temperatura (°C)	Capacità (pF)	Sovraccarichi istantanei (mA) (per 1 μsec)	Corrente diretta per polarizzazione continua di 1V (mA)
Philips	OA5	g.b. al Ge	100	11	200	— 55 + 75		1000	
	OA70	c.p. al Ge	22,5	30	150	— 50 + 75	1		
	OA72	»	45	130	100	— 50 + 60			
	OA73	»	30	1200	150	— 50 + 75	1		[illegible]
	OA79	»	45	130	100	— 50 + 60			
	OA81	»	115	75	150	— 50 + 75			3
	OA85	»	115	75	150	— 50 + 75			5
	OA86	»	90	130	150	— 50 + 60			
	OA91	»	115	75	150	— 50 + 75			
	OA95	»	115	80	150	— 50 + 75			
	OA200	c.p. al Si	50	0,1	150	— 50 +125			10
	OA201	»	100	0,1	120	— 50 +125			10
	OA202	»	150	0,1	100	— 50 +125			10
Raytheon	1N300	c.p. al Si	15	0,001	65	— 50 +150			15
	1N300A	»	15	0,001	80	— 50 +150			30
	1N301	»	70	0,05	45	— 50 +150			5
	1N301A	»	70	0,05	65	— 50 +150			18
	1N302	»	225	0,2	30	— 50 +150			1
	1N302A	»	225	0,2	40	— 50 +150			5
	1N303	»	125	0,1	40	— 50 +150			3
	1N303A	»	125	0,1	55	— 50 +150			12
	1N432	»	40	0,005	55	— 50 +150			10
	1N432A	»	40	0,005	70	— 50 +150			20
	1N460	»	90	0,1	45	— 50 +150			5
	1N460A	»	90	0,1	60	— 50 +150			15
	1N433	»	145	0,1	40	— 50 +150			3
	1N433A		145	0,1	50	— 50 +150			10
	1N434	»	180	0,1	35	— 50 +150			2
	1N434A	»	180	0,1	45	— 50 +150			7
	CK863	»	300	0,3	20	— 50 +150			1
	CK863A	»	300	0,3	30	— 50 +150			3
	1N66	c.p. al Ge	60	800	150	— 50 +100			5
	1N67	»	80	50	100	— 50 +100			4
	1N68	»	100	625	100	— 50 +100			3
	1N294	»	60	800	150	— 50 +100			5
	1N297	»	80	100	100	— 50 +100			3,5
	1N298	»	70	250	150	— 50 +100			
	1N295	»	40	200	125	— 50 +100			
	CK715	»	40		125	— 50 +100			
Siemens-Halske	GD1E	c.p. al Ge	40	1000	100	— 20 + 60	1		5
	GD2E	»	80	500	100	— 20 + 60	1		3
	GD3E	»	100	500	100	— 20 + 60	1		3
	GD4E	»	40	1000	100	— 20 + 60	1		3
	GD5E	»	40	1000	100	— 20 + 60	1		8
	GD6E	»	40	1000	100	— 20 + 60	1		3
	GD71E	»	40	1000	50	— 20 + 60	1		2
	GD8E	»	20	1000	100	— 20 + 60	1		20
	RL31	»	40	1000	100	— 20 + 70	0,7		2
	RL32	»	40	1000	100	— 20 + 70	0,7		2
	RL41	»	20		75	— 20 + 70	0,7		
	RL43	»	80	500	150	— 20 + 70	0,7		2
	RL232	»	40		100	— 30 + 60	0,7		
	RL246	»	40	1000	100	— 20 + 70	0,7		2
	RL247	»	80	500	150	— 20 + 70	0,7		2

segue

seguito Tabella 6

Costruttore	Sigla	Tipo	Tensione inversa di picco (V)	Corrente inversa massima (μA)	Corrente diretta massima di picco (mA)	Limiti di temperatura (°C)	Capacità (pF)	Sovraccarichi istantanei (mA) (per 1 μsec)	Corrente diretta per polarizzazione continua di 1V (mA)
Texas Instruments	600C	giunzione	30		75	+100	2,5		3
	601C	al Si	50		75	+150	2,5		3
	604C	»	5,5	0,1	300	+150	20		60
	606C	»	7,5	0,1	270	+150	16		35
	608C	»	11	0,1	225	+150	12		25
	610C	»	17	0,1	180	+150	7		12
	612C	»	25	0,1	150	+150	5		7
	614C	»	37	0,1	105	+150	3,5		5
	616C	»	52	0,2	90	+125	2,5		3
	618C	»	75	0,2	75	+125	2		1,5
	620C	»	110	0,2	60	+125	1,4		0,9
	622C	»	170	0,2	45	+100	1,2		
	624C	»	250	0,4	30	+ 71	1		
	626C	»	370	1	21	+ 71	0,9		
	628C	»	520	1	15	+ 71	0,7		
	650C	»	4,5	0,1	375	— 50 +150			125
	651C	»	5,4	0,1	360	— 50 +150			100
	652C	»	6,4	0,1	330	— 50 +150			75
	653C	»	8	0,1	300	— 50 +150			60
	660	»	30	0,1	300	— 55 +175	1,4		
	661	»	70	0,1	300	— 50 +175	1,4		
	662	»	150	0,1	300	— 55 +175	1,4		
	663	»	200	0,1	300	— 55 +175	1,4		
	1N544	»	1250	0,3	75	— 55 +150	2		
	1N544A	»	1250	0,4	300	— 55 +150	5		
Transitron	T1	Gold	50	1500	200	— 50 + 80	0,5		20
	T2	bonded	75	300	250	— 78 + 90	0,5		40
	T3	al Ge	75	50	200	— 78 + 90	0,5		20
	T4	»	125	100	180	— 78 + 90	0,5		5
	T5	»	125	100	250	— 78 + 90	0,5		40
	T6	»	40	200	3000	— 78 + 90	0,9		100
	T7	»	75	100	400	— 78 + 90	0,9		200
	T8	»	125	20	300	— 78 + 90	0,9		100
	T9	»	75	20	300	— 78 + 90	0,9		100
	T11	»	40	20	400	— 78 + 90	0,9		100
	T12	»	75	500	250	— 78 + 90	0,9		20
	T13	»	25	2	250	— 78 + 90	0,9		40
	T14	»	25	5	250	— 78 + 90	0,9		40
	T15	»	125		400	— 78 + 90	0,9		125
	T16	»	75		350	— 78 + 90	0,9		40
	T17	»	125	500	200	— 78 + 90	0,9		5
	T18	»	50	125	150	— 78 + 90	0,9		20
	T19	»	60	180	200	— 78 + 90	0,9		200
	T20	»	50	500	125	— 78 + 90	0,9		20
	T21	»	25	50	125	— 78 + 90	0,9		20
	T22	»	15	20	150	— 78 + 90	0,9		40
	T23	»	50	200	150	— 78 + 90	0,9		20
	T24	»	35	300	150	— 78 + 90	0,9		20
	T25	»	30	20	400	— 78 + 90	0,9		200
	1N34	»	75	800	150	— 78 + 90	0,9		5
	1N34A	»	75	500	150	— 78 + 90	0,9		5
	1N35	»	75		60	— 78 + 90	0,9		7,5
	1N38	»	125	625	150	— 78 + 90	0,9		3
	1N38A	»	125	500	150	— 78 + 90	0,9		5
	1N48	»	85	800	200	— 78 + 90	0,9		5
	1N51	»	50	1500	100	— 78 + 90	0,9		2,5
	1N52	»	85	150	150	— 78 + 90	0,9		5
	1N54	»	75		150	— 78 + 90	0,9		5

segue

seguito Tabella 6

Costruttore	Sigla	Tipo	Tensione inversa di picco (V)	Corrente inversa massima (μA)	Corrente diretta massima di picco (mA)	Limiti di temperatura (°C)	Capacità (pF)	Sovraccarichi istantanei (mA) (per 1 μsec)	Corrente diretta per polarizzazione continua di 1V (mA)
Transitron	1N54A	Gold	75	100	150	— 78 + 90	0,9		5
	1N55	bonded	170	800	150	— 78 + 90	0,9		5
	1N55A	al Ge	170	500	150	— 78 + 90	0,9		5
	1N55B	»	190	500	180	— 78 + 90	0,5		5
	1N56A	»	50	300	200	— 78 + 90	0,9		15
	1N58	»	125	800	200	— 78 + 90	0,9		5
	1N58A	»	125	600	150	— 78 + 90	0,9		5
	1N63	»	125		200	— 78 + 90	0,9		5
	1N65	»	85	200	150	— 78 + 90	0,9		5
	1N67A	»	100	50	180	— 78 + 90	0,5		5
	1N68A	»	130	625	180	— 78 + 90	0,5		5
	1N69	»	85	800	125	— 78 + 90	0,9		5
	1N70	»	125	300	125	— 78 + 90	0,9		5
	1N75	»	125		150	— 78 + 90	0,9		5
	1N81	»	50		125	— 78 + 90	0,9		5
	1N89	»	100	100	180	— 78 + 90	0,5		5
	1N90	»	75	500	180	— 78 + 90	0,5		5
	1N95	»	75	500	180	— 78 + 90	0,5		10
	1N96	»	75	500	200	— 78 + 90	0,5		20
	1N96A	»	75	500	250	— 78 + 90	0,5		40
	1N97	»	100	100	180	— 78 + 90	0,5		10
	1N98	»	100	100	200	— 78 + 90	0,5		20
	1N98A	»	100	100	250	— 78 + 90	0,5		40
	1N99	»	100	100	180	— 78 + 90	0,5		10
	1N100	»	100	50	200	— 78 + 90	0,5		20
	1N100A	»	100	50	250	— 78 + 90	0,5		40
	1N111	»	75	125	150	— 78 + 90	0,9		5
	1N112	»	75	250	150	— 78 + 90	0,9		5
	1N113	»	75	125	150	— 78 + 90	0,9		5
	1N114	»	75	250	150	— 78 + 90	0,9		5
	1N115	»	75	500	150	— 78 + 90	0,9		5
	1N116	»	75	100	180	— 78 + 90	0,5		5
	1N117	»	75	100	180	— 78 + 90	0,5		10
	1N118	»	75	100	200	— 78 + 90	0,5		20
	1N118A	»	75	100	250	— 78 + 90	0,5		40
	1N126	»	75	800	180	— 78 + 90	0,5		5
	1N127	»	125	300	180	— 78 + 90	0,5		5
	1N128	»	50	10	180	— 78 + 90	0,5		5
	1N139	»	50	1500	250	— 78 + 90	0,9		20
	1N140	»	85	300	350	— 78 + 90	0,9		40
	1N141	»	85	50	250	— 78 + 90	0,9		20
	1N142	»	125	100	200	— 78 + 90	0,9		5
	1N143	»	125	100	350	— 78 + 90	0,9		40
	1N144	»	40	200	3000	— 78 + 90	0,9		100
	1N191	»	75		180	— 78 + 90	0,5		5
	1N192	»	75		180	— 78 + 90	0,5		5
	1N198	»	50	250	100	— 78 + 90	0,5		5
	1N270	»	75	100	350	— 78 + 90	0,5		200
	1N273	»	35	20	300	— 78 + 90	0,5		100
	1N277	»	125	500	180	— 78 + 90	0,5		5
	1N278	»	50	125	125	— 78 + 90	0,5		20
	1N279	»	35	200	300	— 78 + 90	0,5		100
	1N283	»	25	20	350	— 78 + 90	0,5		200
	1N251	giunzione	30	20	90	— 55 +150	0,8		5
	1N252	al Si	20	20	120	— 55 +150	0,8		10
	S4G	»	20	20	45	— 55 +200	0,8		
	S5G	»	30	20	75	— 55 +200	0,8		
	S6G	»	15	20	90	— 55 +200	0,8		
	S9G	»	40	20	75	— 55 +200	0,8		
	S10G	»	15	20	200	— 55 +200	0,8		

segue

seguito Tabella 6

Costruttore	Sigla	Tipo	Tensione inversa di picco (V)	Corrente inversa massima (μA)	Corrente diretta massima di picco (mA)	Limiti di temperatura (°C)	Capacità (pF)	Sovraccarichi istantanei (mA) (per 1 μsec)	Corrente diretta per polarizzazione continua di 1V (mA)
Westinghouse	WG4A	c.p. al Ge	20	1000	50	— 50 + 85	1	500	2
	WG4B	»	20	1000	50	— 50 + 85	1	500	10
	WG5A	»	40	100	50	— 50 + 85	1	500	1
	WG5B	»	60	1000	50	— 50 + 85	1	500	5
	WG6A	»	60	600	50	— 50 + 85	1	500	1
	WG7B	»	40	10	50	— 50 + 85	1	500	5
	WG7C	»	100	200	50	— 50 + 85	1	500	5
	WG7D	»	100	100	50	— 50 + 85	1	500	3

Tabella 7 – **Raddrizzatori di potenza.**

Costruttore	**Sigla**	Tipo	Tensione inversa di picco (V)	Valore medio di corrente rettificata su carico resistivo (A)	Sovraccarichi istantanei di corrente (A)	Limiti di temperatura (°C)	Corrente inversa media a pieno carico (mA)	Resistenza dinamica diretta (Ω)	Coefficiente di temperatura (V/°C)
C. B. S.	**1N503**	**giunzione**	60	0,33		— 50 +150	0,5		
	1N504	**al Si**	120	0,33		— 50 +150	0,5		
	1N505	»	240	0,33		— 50 +150	0,5		
	1N506	»	360	0,33		— 50 +150	0,5		
	1N507	»	480	0,33		— 50 +150	0,25		
	1N508	»	720	0,33		— 50 +150	0,25		
	1N519	»	60	1,25		— 50 +150	0,5		
	1N520	»	120	1,25		— 50 +150	0,5		
	1N521	»	240	1,25		— 50 +150	0,5		
	1N522	»	360	1,25		— 50 +150	0,5		
	1N523	»	480	1,25		— 50 +150	0,25		
	1N524	»	720	1,25		— 50 +150	0,25		
General Electric	**1N91**	**giunzione**	100	0 15	25	— 55 + 85	2,7		
	1N92	**al Ge**	200	0,1	25	— 55 + 85	1,9		
	1N93	»	300	0,075	25	— 55 + 85	1,2		
	1N151	»	100	0,5	25	— 55 + 85	2,4		
	1N152	»	200	0,5	25	— 55 + 85	1,9		
	1N153	»	300	0,5	25	— 55 + 85	1,2		
	1N158	»	380	0,5	25	— 55 + 85	0,8		
	1N530	**giunzione**	100	0,3	3	— 50 +150	0,003		
	1N531	**al Si**	200	0,3	3	— 50 +150	0,0075		
	1N532	»	300	0,3	3	— 50 +150	0,01		
	1N533	»	400	0,3	3	— 50 +150	0,015		
	1N534	»	500	0,3	3	— 50 +150	0,0175		
	1N535	»	600	0,3	3	— 50 +150	0,02		
Hughes	**HR10211**	**giunzione**	200	0,15	1,5	— 75 +150	0,01		
	HR10212	**al Si**	250	0,15	1,5	— 75 +150	0,01		
	HR10213	»	280	0,15	1,5	— 75 +150	0,01		
	HR10214	«	340	0,15	1,5	— 75 +150	0,01		
	HR10215	»	390	0,15	1,2	— 75 +150	0,01		
	HR10251	»	200	0,2	2	— 75 +150	0,01		
	HR10252	»	250	0,2	2	— 75 +150	0,01		
	HR10253	»	280	0,2	2	— 75 +150	0,01		
	HR10254	»	340	0,2	2	— 75 +150	0,01		
	HR10255	»	390	0,2	2	— 75 +150	0,01		
National Semiconductors	**NSP1R**	**giunzione al Si**	60	20	63	— 55 +200	25		
Pacific Semiconductors inc.	**PS530**	**giunzione**	30	0,125	1	— 50 +150	0,000025		
	PS531	**al Si**	70	0,125	1	— 50 +150	0,000025		
	PS542	»	30	0,15	1	— 50 +150	0,0005		
	PS543	»	70	0,15	1	— 50 +150	0,0005		
	PS550	»	30	0,125	1	— 50 +150	0,0005		
	PS551	»	55	0,125	1	— 50 +150	0,0005		
	PS552	»	70	0,125	1	— 50 +150	0,0005		
	PS553	»	90	0,125	1	— 50 +150	0,0005		
	PS554	»	150	0,125	1	— 50 +150	0,0005		
	PS560	»	30	0,15	1	— 50 +150	0,000025		
	PS561	»	55	0,15	1	— 50 +150	0,000025		
	PS562	»	70	0,15	1	— 50 +150	0,000025		
	PS563	»	90	0,15	1	— 50 +150	0,000025		
	PS564	»	150	0,15	1	— 50 +150	0,000025		

segue

seguito Tabella 7

Costruttore	Siglia	Tipo	Tensione inversa di picco (V)	Valore medio di corrente rettificata su carico resistivo (A)	Sovraccarichi istantanei di corrente (A)	Limiti di temperatura (°C)	Corrente inversa media a pieno carico (mA)	Resistenza dinamica diretta (Ω)	Coefficiente di temperatura (V/°C)
Raytheon	1N537	giunzione	100	0,25		— 65 +165	0,002		
	1N538	al Si	200	0,25		— 65 +165	0,002		
	1N539	»	300	0,25		— 65 +165	0,002		
	1N540	»	400	0,25		— 65 +165	0,002		
	CK844	»	500	0,25		— 65 +165	0,002		
	CK845	»	600	0,25		— 65 +165	0,002		
	CK774	»	25	5	15	150	5		
	CK775	»	60	5	15	150	5		
	CK775-1	»	125	5	15	150	5		
	CK776	»	200	5	15	150	5		
Texas Instruments	1N544	giunzione	1000	0,015		— 55 +150	0,1		
	1N544A	al Si	1000	0,075		— 55 +150	0,1		
	1N543	»	1000	0,005		— 55 +150	0,1		
	1N543A	»	1000	0,025		— 55 +150	0,1		
Transitron	1N457	giunzione	60	0,1		— 55 +200	0,03	0,8	0,001
	1N458	al Si	125	0,1		— 55 +200	0,015	0,8	0,001
	1N459	»	175	0,1		— 55 +200	0,005	0,8	0,001
	1N482	»	36	0,1		— 55 +200	0,03	0,8	0,001
	1N482A	»	36	0,2		— 50 +200	0,015	0,8	0,001
	1N482B	»	36	0,2		— 55 +200	0,005	0,8	0,001
	1N483	»	70	0,1		— 55 +200	0,03	0,8	0,001
	1N483A	»	70	0,2		— 55 +200	0,015	0,8	0,001
	1N383B	»	70	0,2		— 55 +200	0,005	0,8	0,001
	1N484	»	130	0,1		— 55 +200	0,03	0,8	0,001
	1N484A	»	130	0,2		— 55 +200	0,015	0,8	0,001
	1N484B	»	130	0,2		— 55 +200	0,005	0,8	0,001
	1N485	»	180	0,1		— 55 +200	0,03	0,8	0,001
	1N485A	»	180	0,2		— 55 +200	0,015	0,8	0,001
	1N485B	»	180	0,2		— 55 +200	0,005	0,8	0,001
	1N486	»	225	0,1		— 55 +200	0,05	0,8	0,001
	1N486A	»	225	0,2		— 55 +200	0,025	0,8	0,001
	1N487	»	300	0,1		— 55 +200	0,05	0,8	0,001
	1N487A	»	300	0,2		— 55 +200	0,025	0,8	0,001
	1N488	»	380	0,1		— 55 +200	0,05	0,8	0,001
	1N488A	»	380	0,2		— 55 +200	0,025	0,8	0,001
	TM1	»	50	1	6	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TM2	»	50	0,4	2,5	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TM3	»	50	0,2	1,5	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TM11	»	100	1	6	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TM12	»	100	0,4	2,5	— 55 +215	0,3	0,5	0,001
	TM13	»	100	0,2	1,5	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TM21	»	200	1	6	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TM22	»	200	0,4	2,5	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TM23	»	200	0,2	1,5	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TM31	»	300	1	6	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TM32	»	300	0,4	2,5	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TM33	»	300	0,2	1,5	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TM41	»	400	1	6	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TM42	»	400	0,4	2,5	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TM43	»	400	0,2	1,5	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TM51	»	500	1	6	— 55 +125	0,3	0,5	0,001

segue

seguito Tabella 7

Costruttore	Sigla	Tipo	Tensione inversa di picco (V)	Valore medio di corrente rettificata su carico resistivo (A)	Sovraccarichi istantanei di corrente (A)	Limiti di temperatura (°C)	Corrente inversa media a pieno carico (mA)	Resistenza dinamica diretta (Ω)	Coefficiente di temperatura (V/°C)
Transitron	TM52	giunzione	500	0,4	2,5	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TM53	al Si	500	0,2	1,5	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TM61	»	600	1	6	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TM62	»	600	0,4	2,5	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TM63	»	600	0,2	1,5	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TM73	»	700	0,2	1,5	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TM83	»	800	0,2	1,5	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TM103	»	1000	0,2	1,5	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TM123	»	1200	0,2	1,5	— 55 +125	0,3	0,5	0,001
	TJ40A	»	400	0,2	1	— 65 +200	0,5	1	0,001
	TJ35A	»	350	0,2	1	— 65 +200	0,5	1	0,001
	TJ30A	»	300	0,2	1	— 65 +200	0,5	1	0,001
	TJ25A	»	250	0,2	1	— 65 +200	0,5	1	0,001
	TJ20A	»	200	0,2	1	— 65 +200	0,5	1	0,001
	TJ15A	»	150	0,2	1	— 65 +200	0,5	1	0,001
	TJ10A	»	100	0,2	1	— 65 +200	0,5	1	0,001
	TJ5A	»	50	0,2	1	— 65 +200	0,5	1	0,001
	TM66	»	600	0,2	5	— 65 +175	0,5	2	0,001
	TM56	»	500	0,2	5	— 65 +175	0 5	2	0 001
	1N342	»	400	0 2	5	— 65 +175	0,5	2	0,001
	1N344	»	300	0,2	5	— 65 +175	0,5	2	0,001
	1N346	»	200	0,2	5	— 65 +175	0,5	2	0,001
	1N349	»	100	0,2	5	— 65 +175	0,5	2	0,001
	1N333	»	400	0,2	5	— 65 +175	0,5	2	0,001
	1N335	»	300	0,2	5	— 65 +175	0,5	2	0,001
	1N337	»	200	0,2	5	— 65 +175	0,5	2	0,001
	1N340	»	100	0,2	5	— 65 +175	0,5	2	0,001
	TM65	»	600	0,4	10	— 65 +175	0,5	0,8	0,001
	TM55	»	500	0,4	10	— 65 +175	0,5	0,8	0,001
	1N341	»	400	0,4	10	— 65 +175	0,5	0,8	0,001
	1N343	»	300	0,4	10	— 65 +175	0,5	0,8	0,001
	1N345	»	200	0,4	10	— 65 +175	0,5	0,8	0,001
	1N348	»	100	0,4	10	— 65 +175	0,5	0,8	0,001
	TM5	»	50	0,4	10	— 65 +175	0,5	0,8	0,001
	1N332	»	400	0,4	10	— 65 +175	0,2	0,8	0,001
	1N334	»	300	0,4	10	— 65 +175	0,2	0,8	0,001
	1N336	»	200	0,4	10	— 65 +175	0,1	0,8	0,001
	1N339	»	100	0,4	10	— 65 +175	0,1	0,8	0,001
	TM64	»	600	1	20	— 65 +175	0,5	0,4	0,001
	TM54	»	500	1	20	— 65 +175	0,5	0,4	0,001
	TM44	»	400	1	20	— 65 +175	0,5	0,4	0,001
	TM34	»	300	1	20	— 65 +175	0,5	0,4	0,001
	TM24	»	200	1	20	— 65 +175	0,5	0,4	0,001
	1N347	»	100	1	20	— 65 +175	0,5	0,4	0,001
	1N338	»	100	1	20	— 65 +175	0,2	0,4	0,001
	TM4	»	50	1	20	— 65 +175	0,5	0,4	0,001
	TM47	»	400	3	20	— 65 +175	0,5	0,1	0,001
	TM37	»	300	3	20	— 65 +175	0,5	0,1	0,001
	TM27	»	200	3	20	— 65 +175	0,5	0,1	0,001
	TM17	»	100	3	20	— 65 +175	0,5	0,1	0,001
	TM7	»	50	3	20	— 65 +175	0,5	0,1	0,001
	TR401	»	400	10	40	— 65 +175	5	0,02	0,001
	TR351	»	350	10	40	— 65 +175	5	0,02	0,001
	TR301	»	300	10	40	— 65 +175	5	0,02	0,001
	TR251	»	250	10	40	— 65 +175	5	0,02	0,001
	1N250	»	200	10	40	— 65 +175	5	0,02	0,001
	TR151	»	150	10	40	— 65 +175	5	0,02	0,001
	1N249	»	100	10	40	— 65 +175	5	0,02	0,001

segue

seguito Tabella 7

Costruttore	Sigla	Tipo	Tensione inversa di picco (V)	Valore medio di corrente rettificata su carico resistivo (A)	Sovraccarichi istantanei di corrente (A)	Limiti di temperatura (°C)	Corrente inversa media a pieno carico (mA)	Resistenza dinamica diretta (Ω)	Coefficiente di temperatura (V/°C/)
Transitron	1N248	giunzione al Si	50	10	40	— 65 +175	5	0,02	0,001
	TR402		400	20	100	— 65 +175	5	0,006	0,001
	TR352	»	350	20	100	— 65 +175	5	0,006	0,001
	TR302	»	300	20	100	— 65 +175	5	0,006	0,001
	TR252	»	250	20	100	— 65 +175	5	0,006	0,001
	1N250A	»	200	20	100	— 65 +175	5	0,006	0,001
	TR152	»	150	20	100	— 65 +175	5	0,006	0,001
	1N249A	»	100	20	100	— 65 +175	5	0,006	0,001
	1N248A	»	50	20	100	— 65 +175	5	0,006	0,001
	TH402	»	400	35	200	— 65 +175	5	0,003	0,001
	TH352	»	350	35	200	— 65 +175	5	0,003	0,001
	TH302	»	300	35	200	— 65 +175	5	0,003	0,001
	TH252	»	250	35	200	— 65 +175	5	0,003	0,001
	1N413A	»	200	35	200	— 65 +175	5	0,003	0,001
	TH152	»	150	35	200	— 65 +175	5	0,003	0,001
	1N412A	»	100	35	200	— 65 +175	5	0,003	0,001
	1N411A	»	50	35	200	— 65 +175	5	0,003	0,001

BIBLIOGRAFIA

BEVITT W. D., *Transistors Handbook*, Prentice Hall. inc., 1956.

COBLENZ A. - H. L. OWENS, *Transistors, theory and applications*, Mc Graw-Hill Book Company, inc., 1955.

DITCHBURN R. W. - N. F. MOTT, *Semi-conducting materials*, Butterworths-scientific pubblications ltd., 1951.

LO A. W. - R. O. ENDERS - J. ZAWELS - F. D. WALDHAUER - CHUNG-CHIH-CHENG, *Transistor Electronics*, Prentice Hall, inc., marzo 1956.

MOLLOY E., *Crystal rectifiers and transistors*, George Newnes limited, 1954.

PEASLEE D. C., *Elements of atomic phisics*, Prentice Hall, inc., 1955.

SHEA R. F., *Principles of transistor circuits*, J. Wiley and Sons, inc., maggio 1954.

SHEA R. F., *Transistor audio amplifiers*, J. Wiley and Sons, inc., 1955.

SHOCKLEY W., *Electrons and holes in semiconductors*, D. Van Nostrand Company, ottobre 1955.

BECKER M., *Measurement of the lifetime of minority carriers in Germanium*, « Journal of applied physics », aprile 1955.

BENNETT D. C. - B. SAWYER, *Single Crystals of exceptional perfection and uniformity by zone leveling*, « Bell System Technical Journal », maggio 1956.

BIRMAN J. L., *On zone refining*, « Journal of applied physics », ottobre 1955.

BORNEMAN E. H. - R. F. SCHWARZ - J. J. STICKLER, *Rectification properties of metal semiconductor contacts*, « Journal of applied physics », agosto 1955.

BRATTAIN W. H. - C. G. B. GARRETT, *Surface properties of semiconductors*, Monografia n. 2412, Bell Telephone Laboratories.

BRIDGERS H. E., *A modern semiconductor - Single crystal Germanium*, Monografia n. 2552, Bell Telephone Laboratories.

BRIDGERS H. E., *Single crystal Germanium*, « Bell Laboratories Record », febbraio 1955.

BURTON J. A., *Impurity centers in Ge and Si*, Monografia n. 2449, Bell Telephone Laboratories.

CHAPIN D. M. - C. S. FULLER - G. L. PEARSON, *The Bell Solar Battery*, « Bell Laboratories Record », luglio 1955.

CONWELL E. M., *Properties of Silicium and Germanium*, « P.I.R.E. », novembre 1952.

CUTLER M., *Forward characteristic of Germanium point contact rectifiers*, « Journal of applied physics », agosto 1955.

DACEY G. C. - I. M. ROSS, *The field effect transistor*, « Bell System Technical Journal », Novembre 1955.

DARROW K. K., *Electronic conductors*, « Bell Laboratories Record », marzo 1955.

FINK D. G., *Transistors versus vacuum tubes*, « P.I.R.E. », aprile 1956.

FORSTER J. H. - L. E. MILLER, *The effect of surface treatments on point-contact transistor characteristics*, « Bell System Technical Journal », luglio 1956.

GOSSICK B. R., *On the transient behavior of semiconductor rectifiers*, « Journal of applied physics », novembre 1955.

HALL R. N., *Power rectifiers and transistors*, « P.I.R.E. », novembre 1952.

HENRY R. M., *Les diodes a pointe a cristal de Germanium*, « L'Onde Electrique », marzo 1956.

HROSTOWSKI H. J., *Intermetallic semiconductors*, « Bell Laboratories Record », luglio 1956.

LEDERHANDLER S. R. - L. J. GIACOLETTO, *Measurement of minority carrier lifetime and surface effects in junction devices*, « P.I.R.E. », aprile 1955.

LEE C. A., *A high frequency diffused base Germanium transistor*, « Bell System Technical Journal », gennaio 1956.

LINDBERG O., *Hall Effect*, « P.I.R.E. », novembre 1952.

MERCIER J. M., *La technologie du Germanium*, « L'Onde Electrique », luglio 1954.

MUELLER C. W. - N. H. DITRICK, *Uniform Planar Alloy Junctions for Germanium Transistors*, « R.C.A. Review », marzo 1956.

MUSS D. R., *Capacitance measurements on alloyed indium-germanium junction diodes*, « Journal of applied physics », dicembre 1955.

NAVON D. - R. BRAY - H. Y. FAN, *Lifetime of injected carriers in Germanium*, « P.I.R.E. », novembre 1952.

PELL E. M., *Reverse current and carrier lifetime as a function of temperature in germanium junction diodes*, « Journal of applied physics », giugno 1955.

PFANN W. G., *Temperature Gradient Zone Melting*, Monografia n. 2451, Bell Telephone Laboratories.

PFANN W. G. - K. M. OLSEN, *Zone melting*, « Bell Laboratories Record », giugno 1955.

PISTOULET B., *Mesures des proprietés des semi-conducteurs*, « L'Onde Electrique », febbraio 1955.

PRINCE M. B., *Silicon solar energy converters*, « Journal of applied physics », maggio 1955.

ROOSBROECK (VAN) W., *Injected current carriers in a semiconductor*, Monografia n. 2411, Bell Telephone Laboratories.

ROSS I. M., *The field effect transistor*, « Bell Laboratories Record », maggio 1955.

ROTH L. - W. E. TAYLOR, *Preparation of Germanium single crystals*, « P.I.R.E. », novembre 1952.

SASSIER M., *Les radresseurs de puissance au Germanium*, « L'Onde Electrique », marzo 1956.

SHIVE J. N. - P. ZUK, *Junction Phototransistors*, « Bell Laboratories Record », dicembre 1955.

SHOCKLEY W., *Transistor electronics: Imperfections, Unipolar and Analog Transistors,* « P.I.R.E. », novembre 1952.

SITTNER W. R., *Current moltiplication in the type - A transistor,* « P.I.R.E. », aprile 1952.

SMITH K. D., *Grown Junction transistor development,* « Bell Laboratories Record », ottobre 1955.

SPITZER W. G. - T. E. FIRLE - M. CUTLER - R. G. SHULMAN - M. BECKER, *Measurement of the lifetime of minority carriers in Germanium,* « Journal of applied physics », aprile 1955.

STEVENSON D. T. - R. J. KEYES, *Measurement of carrier lifetimes in Germanium and Silicon,* « Journal of applied physics », febbraio 1955.

TEAL G. K. - M. SPARKS - E. BUEHLER, *Single Crystal Germanium,* « P.I.R.E. », agosto 1952.

VALDES L. B., *Measurement of minority carrier lifetime in Germanium,* « P.I.R.E. », novembre 1952.

VALDES L. B., *Resistivity measurements on Germanium for transistors,* « P.I.R.E. », febbraio 1954.

VALDES L. B., *Semiconductors - Resistivity and lifetime measurements,* « Bell Laboratories Record », agosto 1955.

VALDES L. B., *Transistor forming effects in N-type Germanium,* « P.I.R.E. », aprile 1952.

WAHL A. L. - J. J. KLEIMACK, *Factors affecting reliability of alloy junction transistors.* Monografia n. 2604, Bell Telephone Laboratories.

WALLACE Jr. R. L., *Junction tetrode transistor,* « Bell Laboratories Record », aprile 1955.

WALTZ M. C. *Electrical contacts for transistors and diodes,* « Bell Laboratories Record », luglio 1955.

WILSON D. K., *Semiconductor diodes,* « Bell Laboratories Record », giugno 1955.